

# 基于肌力信号与电刺激感觉反馈的多自由度机械手人机交互控制

李楠<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 霍宏<sup>1</sup>, 叶玉璇<sup>1</sup>, 姜力<sup>2</sup>

(1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854;  
2. 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:** 为使操作者能够灵活控制多自由度机械手并能感受到机械手的抓取力, 提出了一种具有双向信息传输能力的可穿戴式人机交互系统及控制方法。该系统利用压力传感器(FSR)阵列采集与操作者手部动作对应的前臂肌力信号, 基于SVM(支持向量机)多类分类器算法实现对手部动作的识别, 通过发送动作模式码控制机械手动作。另外, 基于经皮神经电刺激(TENS)原理, 将机械手抓取力信号转变为电刺激信号刺激体表皮肤, 实现机械手抓握力向人体的感觉反馈。实验表明, 基于肌力信号和SVM分类器的动作模式识别方法可实现对10种手部动作的识别, 成功率不低于95%; 电刺激感觉反馈可向人体准确反馈抓取力感并实现盲抓取。

**关键词:** 人机交互; 机械手; 肌力信号; 电刺激; 感觉反馈

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-06-0718-07

## Human-Machine Interaction Control Based on Force Myograph and Electrical Stimulation Sensory Feedback for Multi-DOF Robotic Hand

LI Nan<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, HUO Hong<sup>1</sup>, YE Yuxuan<sup>1</sup>, JIANG Li<sup>2</sup>

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;  
2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China)

**Abstract:** A wearable bi-directional human-machine interaction (HMI) system and its control methods are proposed to enable the user to control multi-DOF robotic hand freely and feel the gripping force from the robotic hand. A force sensory resistor (FSR) array is built to measure the forearm force myographic (FMG) signals corresponding to different hand motions of the user. A multiclass classifier is designed based on the support vector machine (SVM) algorithm to recognize the hand motions and generate motion codes to control the robotic hand movements. Moreover, sensory feedback is achieved by transforming the gripping force signals of the robotic hand into electrical stimulation signals of skin based on the principle of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS). Experimental results show that the motion mode recognition method based on FMG and SVM can identify 10 typical hand motions with the accuracy of above 95%. The electrical stimulation method can feed back the perception of gripping force to the body accurately and help the user to grip objects without vision.

**Keywords:** human-machine interaction; robotic hand; FMG (force myograph); electrical stimulation; sensory feedback

## 1 引言 (Introduction)

随着机器人技术的发展, 机械手在外形、尺寸、重量、灵活性和感知能力等方面得到了大幅度提高并已接近人手<sup>[1-2]</sup>, 开始被广泛应用于空间探测<sup>[3-4]</sup>、危险环境作业<sup>[5-6]</sup>、康复工程<sup>[7-8]</sup>等多个领域。在这些应用中, 机械手主要作为操作者行为能力和感知能力的延伸, 用于准确执行操作者的动作指令并向操作者反馈环境信息。这就需要一种具有双向信息交互能力的人机交互(HMI)系统来将人作为控制系统的一部分参与到机械手的控制中。

目前, 机械手HMI系统主要有控制手柄<sup>[5]</sup>、

数据手套<sup>[9-10]</sup>、肌电控制<sup>[11-12]</sup>、肌力控制<sup>[13]</sup>等实现方式。其中, 控制手柄是操作者通过按按钮和转动操纵杆来完成对机械手动作的控制, 实现简单、具备简单的力感觉反馈能力, 但可控制机械手完成的动作少、操作繁琐且不直观, 多用于自由度少的机械手爪的抓取控制; 数据手套的工作原理是通过测量操作者手指各个关节的角度来控制机械手各个关节转动到相应角度完成抓取动作, 具有控制直接、灵活, 力感觉反馈丰富、准确的特点, 可实现对机械手每根手指的独立控制并向操作者的手指施加力感觉反馈<sup>[14]</sup>, 但该系统价格昂贵、组成复

杂庞大、无法随身携带, 且仅能通过人手动作完成对机械手的操作, 使其应用受到较大限制, 目前主要用于对多自由度灵巧手的控制; 肌电控制和肌力控制方式通过对操作者前臂生物信号的模式识别提取手部动作模式指令, 机械手按照模式指令完成抓取动作, 该方式具有控制直观、组成简单、便于携带、不依赖人手操作便可实现对机械手多种动作的控制等特点, 具有良好的通用性和适应性, 但仍缺乏成熟有效的力感觉反馈能力, 多用于多自由度仿生假手控制<sup>[11-13]</sup>以及机械手遥操作<sup>[15-16]</sup>。

综合考虑上述各种 HMI 系统的优缺点, 从控制性能和实用性的角度出发, 本文提出了基于肌力信号和电刺激感觉反馈的多自由度机械手人机交互系统构架和控制方法。与肌电信号相比, 肌力信号具有信号幅值高、平稳、易于提取和处理, 不受汗水、电磁或电流干扰的优势<sup>[17]</sup>。目前已可实现对 6 种以上手部动作的提取和识别<sup>[13]</sup>, 但仍难以满足对多自由度机械手灵活控制的需要。另外, 在感觉反馈方面目前主要有机械振动和电刺激两种方式。相比较而言, 电刺激方式具有耗电小、无噪音、电极结构简单、刺激感丰富且直接、传输信息量大等优点, 但刺激位置的变化或接触不良可能引起疼痛感<sup>[18]</sup>。

## 2 人机交互系统设计 (Design of the human-machine interaction system)

本文设计的机械手 HMI 系统主要由主控单元、肌力信号采集通道 (包括压力传感器阵列和肌力信号采集单元)、电刺激感觉反馈通道 (包括电刺激器和电刺激电极) 3 部分组成, 如图 1 所示。具体的工作过程如下: 人手在动作时前臂肌肉膨胀挤压贴附在前臂皮肤表面的压力传感器阵列产生压力信号 (简称肌力信号)。肌力信号采集单元将该信号进行 A/D 转换后向主控单元发送。主控单元通过对肌力信号进行模式识别获得手部动作模式, 然后通过通讯接口发送给机械手。机械手接到动作模式命令后, 根据预先设置好的对应动作完成对各个手指的运动控制, 从而实现人体对机械手的动作控制。与此同时, 机械手将传感器信息通过通讯接口发送给 HMI 系统的主控单元。主控单元根据所获得的传感器信息生成电刺激指令传递给电刺激器产生电刺激信号, 并由电刺激电极传递到人体皮肤表面, 使感觉神经细胞产生神经冲动, 从而实现机械手向人体的感觉反馈。下面对该 HMI 系统的各部分设计进行详述。

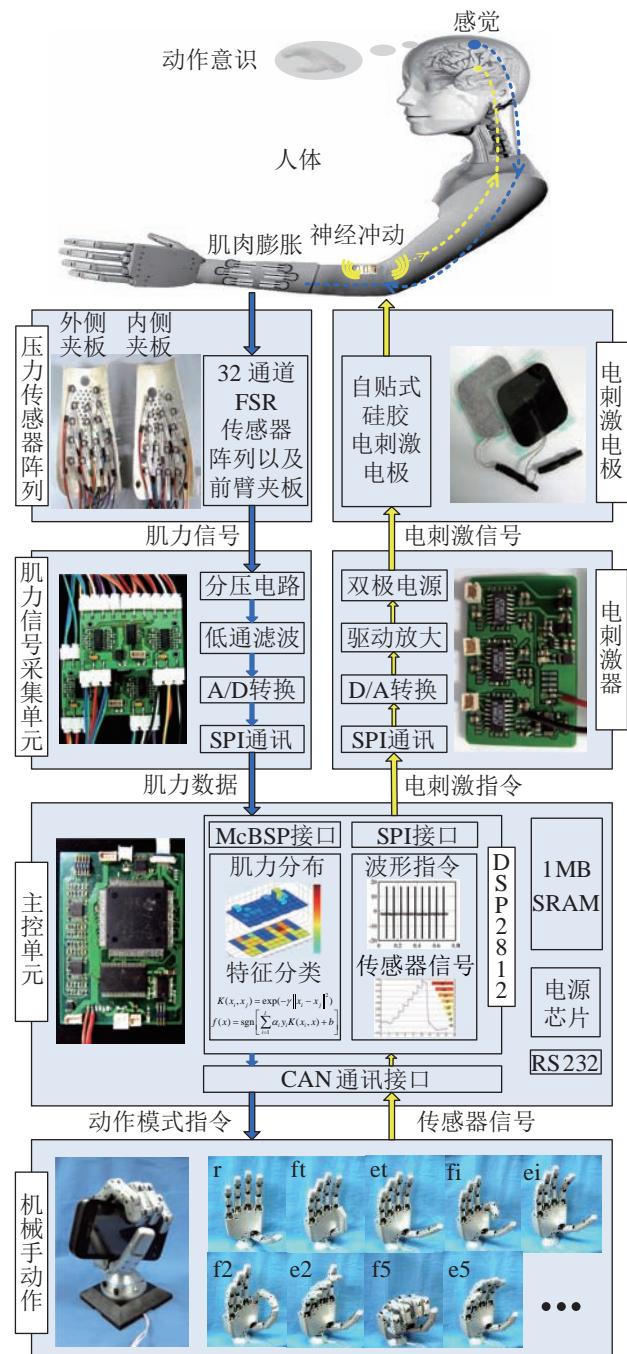


图 1 HMI 系统组成

Fig.1 Framework of the human-machine interface system

### 2.1 主控单元

主控单元是 HMI 系统的控制核心, 主要功能包括: 1) 对人体前臂肌力信号进行处理和特征分类, 识别使用者的手部动作模式; 2) 向机械手发送动作模式指令并接收机械手上传的传感器信息; 3) 生成电刺激指令, 控制电刺激器刺激人体。本文使用 DSP 芯片 TMS320F2812 作为处理器, 工作频率 150 MHz, FLASH 存储空间 128 k×16 位, SRAM 存储空间 18 k×16 位。该处理器自带两个串行通讯接口 (SCI)、一个区域网络控制器 (CAN) 接口, 一

个串行外围接口 (SPI), 一个多通道缓冲串行接口 (McBSP). 主控单元为这些通讯接口配备外围电路, 使其形成完整的通讯总线. 其中对 CAN 总线控制器接口扩展了一个 CAN 总线收发器, 用于与机械手的数据通讯; 将一路 SCI 扩展为 RS-232 标准的串行总线, 可用于与 PC 机进行通信; 通过 SPI 接口或 McBSP 接口与肌力信号采集单元或电刺激器进行通信. 另外, 根据运行模式识别算法所需存储空间的要求, 外扩了容量为  $512\text{ kB} \times 16$  的 SRAM 存储器.

## 2.2 肌力信号采集通道

肌力信号采集通道包括 FSR 压力传感器阵列和肌力信号采集单元两部分. 压力传感器阵列由 32 枚 FSR-149NS 型压力传感器组成, 安装在前臂夹板内. 前臂夹板通过绷带绑缚在前臂上. 为了获得连续、稳定的肌力信号, 需要保证传感器阵列与前臂良好接触, 以获得适中的预紧力, 为此, 对前臂夹板进行了设计. 如图 1 所示, 在前臂夹板上均匀打满固定孔, 将平头螺钉用两个螺母固定在相应的孔位上. 把 FSR 传感器牢固贴敷于螺钉头上, 从而通过调整螺钉头的伸长量  $L$  即可调整作用在传感器上的预紧力, 见图 2. 本文设定的预紧力信号为 2 V, 约为传感器信号量程 (0 ~ 5 V) 的 40%.

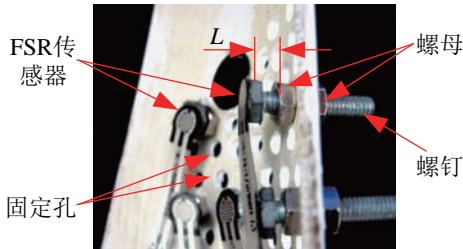


图 2 前臂夹板及预紧力调整装置

Fig.2 Socket and the preload adjustment device

肌力信号采集单元由分压电路、低通滤波电路和 A/D 转换电路组成, 如图 1 所示. 分压电路将肌肉挤压 FSR 传感器引起的传感器阻值变化转化成 0 ~ 5 V 之间变化的电压信号, 并经低通滤波和 A/D 转换后通过 SPI 接口传给主控单元.

## 2.3 电刺激感觉反馈通道

本文设计的电刺激感觉反馈通道基于经皮神经电刺激 (transcutaneous electrical nerve stimulation, TENS) 原理<sup>[19]</sup>, 是一种通过电脉冲刺激人体体表, 引发感觉神经产生神经冲动的感觉激发装置. 可将机械手传感器系统采集到的人体不可识别的传感器信号按强弱分等级转换成人体可识别的电刺激感受, 从而形成机械手向人体反馈感觉的能力.

本文设计的电刺激感觉反馈通道的基本组成如图 1 右侧图片所示, 包括电刺激电极和电刺激器两部分. 其中, 电刺激电极采用医用自贴式硅胶电极, 该电极具有刺激感柔和、与皮肤接触良好、使用广泛、价格便宜的优点; 电刺激器为自行研制的多通道微型电刺激器, 每通道强弱刺激等级分为 8 级, 与机械手传感器信号强弱相对应, 如图 3 所示, 图中 “F” 表示机械手传感器信号最大值. 电刺激波形为被调制的中频对称双极性脉冲, 如图 4 所示, 由中频载波 (2000 Hz) 和低频调制波 (0 ~ 80 Hz) 组成, 电刺激感受变化与调制波的频率变化对应.  $T$  为调制波周期,  $t_1$  为刺激时间,  $t_2$  为间隔时间. 其中,  $t_1$  为固定值 2.5 ms, 包含 5 个载波周期, 而  $t_2$  随  $T$  变化.

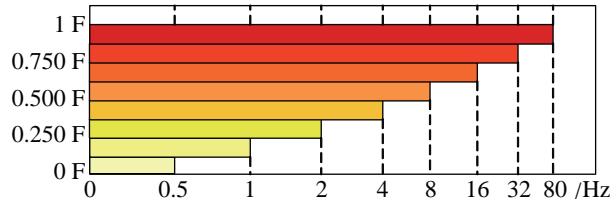


图 3 传感器信号与电刺激强度等级的对应关系

Fig.3 Relationship between the sensor signal and stimulus intensity level

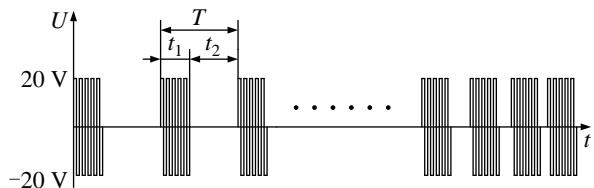


图 4 电刺激波形示意

Fig.4 Waveform of the electrical stimulation

## 3 基于肌力信号的手部多动作模式识别 (Multi hand motion recognition based on FMG)

采用 FSR 压力传感器阵列获得前臂肌肉的肌力信号, 信号中含有肌肉膨胀与收缩形态特征, 可以表征不同手部动作时前臂肌肉的不同形状变化. 为便于数据分析, 可将 32 路肌力信号按压力传感器阵列的布局进行排布, 可获得不同手部动作对应的肌力分布图 (FMG distribution map, FDM), 如图 5、图 6 所示. 其中图 5 显示了食指伸展时 FSR 传感器阵列采集到的肌力分布信号. 可以看出该信号幅值变化明显, 信号稳定. 32 路肌力信号数据按图 1 所示的传感器位置可布置成  $5 \times 10$  点阵图, 如图 5 右图所示. 该点阵图包括下部的 2 维彩色点阵和上部的 3 维条形图. 2 维点阵用小方格显示了传感器

的排布位置, 并通过小方格的颜色粗略地表示了该处传感器所受压力的大小。颜色由浅蓝向深红色变化表示压力从小向大的增长, 而深蓝色小格处无传感器, 为布图用的填充点。上部的3维条形图直接通过长条的高度表示了传感器的受力程度, 3维条的高低起伏也可以形象地显示出手指动作时前臂肌肉的形变状况。

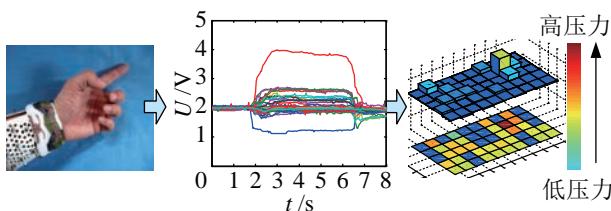


图5 肌力分布图的生成过程

Fig.5 Measurement procedure of the FDM

图6则显示了本文根据操作任务需求和使用具体情况选择出的10种手部动作及其FDM图, 具体为: 放松(r), 拇指弯屈(ft), 食指弯屈(fi), 中指弯屈(fm), 无名指弯屈(fr), 小指弯屈(fl), 拇指和食指的两指捏取(f2), 拇指、食指及中指的三指抓取(f3), 五指抓取(f5)/伸展(e5)。然后便可以采用模式识别算法根据FDM与手部动作的一一对应关系实现手部运动模式的识别。

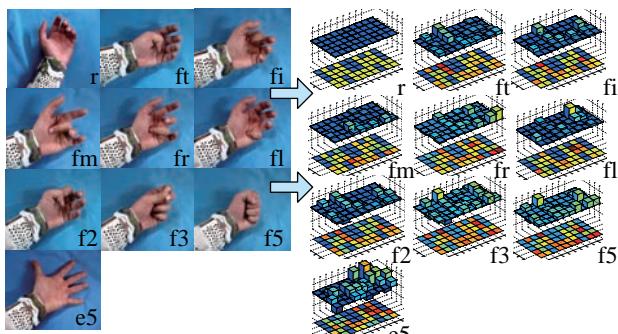


图6 10种手部动作及其对应的FDM

Fig.6 10 hand motions and their corresponding FDMs

本文通过构建SVM多类分类器来实现对上述10种动作模式的FDM识别。因此, 根据“一对一”法则<sup>[20]</sup>共需要  $n(n-1)/2$ 个SVM二值分类器来构建该多值分类器, 此处  $n=10$ 。然后通过“投票法”<sup>[20]</sup>对所有二值分类器的输出进行决策。

对于每一个二值分类器, 首先需要用训练样本集进行训练, 设一个用于区分动作“fm”和“ft”的二值分类, 其由  $m$ 个数据样本组成的训练样本集应为  $\{(\mathbf{x}_k, y_k) | k=1, 2, \dots, m\}$ , 其中  $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{32}$  是32维的肌力信号输入向量,  $y_k \in \{1, -1\}$  是输出。训练后

得到判别函数:

$$y(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left[ \sum_{k=1}^m \alpha_k y_k \psi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) + b \right]$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{mode fm} \\ -1 & \text{mode ft} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{x}$  为待分类的一个32维肌力信号输入向量,  $\alpha_k \in \mathbb{R}$  是拉格朗日乘子, 支持向量与  $\alpha_k$  不为零的样本相对应,  $b \in \mathbb{R}$  为分类阈值,  $\psi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k)$  为非线性的径向基核函数, 如式(2)所示:

$$\psi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|^2), \quad \gamma > 0 \quad (2)$$

若经二值分类后  $\mathbf{x}$  被识别为动作“fm”, 则动作“fm”的票数加1, 否则动作“ft”的票数加1。经过  $n(n-1)/2$  次二值分类后, 票数最高的为所识别出的动作类别。

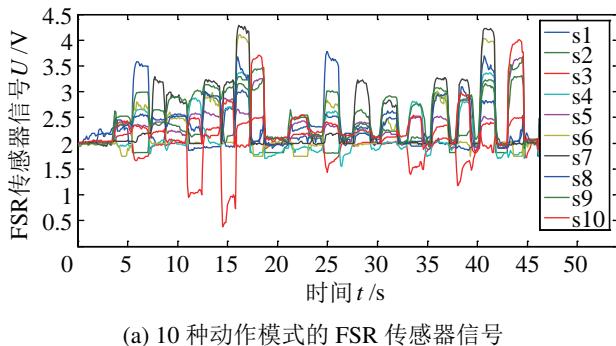
#### 4 实验与分析 (Experiment and analysis)

本文利用建立的机械手HMI系统以HIT IV机械手<sup>[7]</sup>为控制对象进行多动作模式识别实验和盲抓取实验。HIT IV机械手具有5个可独立运动的手指, 每个手指由1个电机驱动, 手指的3个关节耦合运动。该机械手不仅具有仿人手的尺寸、外观和重量, 而且机构、传感器、驱动和控制系统高度集成, 具有关节位置和关节力矩传感器, 可提供机械手的抓取力信息和关节转角位置。在多动作模式识别试验中, 本文利用该机械手执行所识别出的动作模式, 从而直观地验证基于肌力信号的多动作模式识别算法的有效性; 在盲抓取实验中, 将机械手感知到的抓取力信息以电刺激方式反馈给人体, 用来验证感觉反馈对于机械手稳定可靠抓握的有效性和重要性, 同时也最终验证了本文的交互控制系统和方法的有效性。

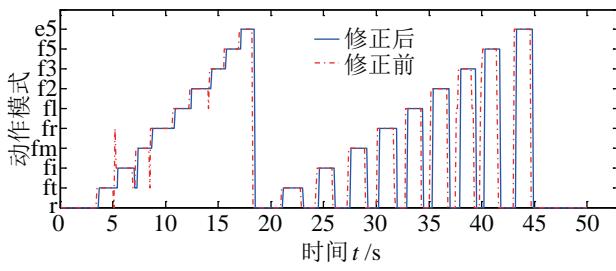
##### 4.1 多动作模式识别实验

本实验有两名受试者参与, 并分别使用左臂和右臂进行实验, 一次实验仅使用一只手臂。受试者佩戴上FSR传感器阵列后, 前臂垂直于桌面放置, 保持前臂肌肉放松。然后受试者按照放松、拇指弯屈、食指弯屈、中指弯屈、无名指弯屈、小指弯屈、拇指和食指两指捏取、拇指与食指及中指三指抓取、五指抓取、五指伸展的顺序进行动作, 每个动作停顿约5s, 并由HMI系统完成对各个动作的训练样本的采集, 每个动作采集50个样本, 采样频率10Hz。然后SVM分类器根据所采集的样本自动进行训练。训练完成后HMI系统的指示灯闪烁,

提示受试者可进行后续试验。受试者首先按前述动作顺序连续完成 10 个动作，然后再以每完成一个动作放松 1 s 的方式依次完成前述动作，这样便完成了一组实验。图 7(a) 显示了受试者 A 右手佩戴 FSR 传感器阵列进行实验时，其中 10 枚传感器的压力信号曲线。与此同时，HMI 系统通过 SVM 分类器对实时采集到的压力信号数据进行在线动作识别，图 7(b) 红色点划线显示了与图 7(a) 对应的动作识别结果。识别结果经过三取二判别后得出最终动作模式指令，如图 7(b) 蓝色实线所示。最后，HMI 系统通过 CAN 总线将动作模式指令传递给机械手，由机械手的运动控制系统根据动作模式指令选择预设的动作手形，控制各手指运动到期望位置，如图 8 所示。



(a) 10 种动作模式的 FSR 传感器信号



(b) 修正前后的动作模式识别结果

图 7 FSR 传感器信号及手部动作模式识别结果

Fig.7 FSR signals and hand motion recognition outputs

从图 7(b) 红色点划线可以看出，SVM 分类器的直接动作识别结果成功率很高，仅仅在动作切换时出现了少量的误识别，而动作稳定后几乎没有识别错误。这是由于训练样本集是在动作稳定时采集的，未包含动作切换时的特征信息，因此实验中的误识别主要出现在动作切换处。为了减小动作切换的干扰，本文对 SVM 分类器的直接输出结果进行了三取二判别，即将当前识别结果与前两次识别结果比较，如果当前结果与前两次结果中的一个相同，则将当前识别结果输出给机械手，否则输出前次的输出结果。经过修正后输出的识别结果如图 7(b) 中蓝色实线所示，动作切换时的误识别基本消

除，避免了误识别可能引起的机械手动作跳动，从而提升了操作可靠性。

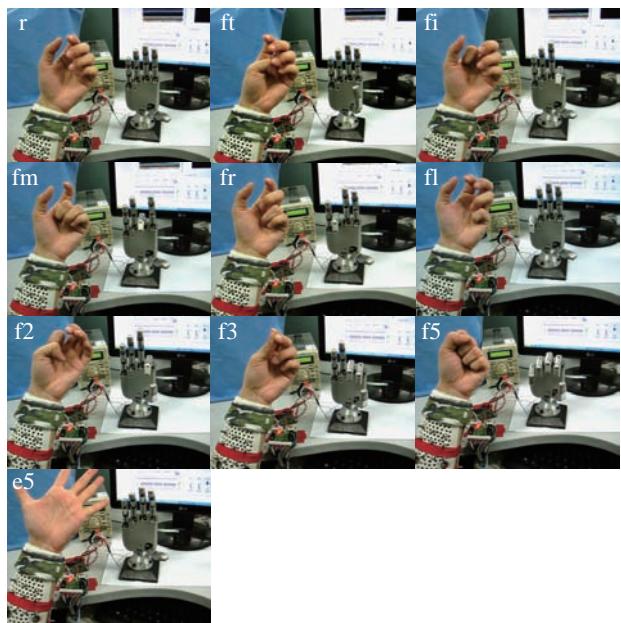


图 8 实时动作模式识别实验帧图

Fig.8 Video frames of real-time motion recognition experiment

每个受试者每只手臂需完成 3 组实验，每组实验间隔 1 min。实验过程中，若机械手动作与人手动作一致且动作切换平稳，则表明动作识别正确，否则认为识别错误。表 1 显示了两名受试者分别用左、右臂进行各组实验的动作识别成功率以及 3 组实验的总成功率。实验表明，本文的动作模式识别方法可以在嵌入式系统上良好使用，识别成功率不低于 95%，由于两名实验者在生活中均习惯用右手，因此对右手动作的识别成功率略高。SVM 分类器的在线识别频率不低于 5 Hz，小于动作迟滞感的临界时间 300 ms<sup>[21]</sup>，受试者对机械手的直观控制感觉强烈。

表 1 手部动作识别成功率

Tab.1 Accuracy of the hand motion recognition

名称	第 1 组成	第 2 组成	第 3 组成	平均成功率
	功率 /%	功率 /%	功率 /%	± 标准差 /%
受试者 A 左臂	95	100	95	96.66 ± 2.89
受试者 A 右臂	100	100	100	100 ± 0
受试者 B 左臂	95	95	95	95 ± 0
受试者 B 右臂	95	100	100	98.33 ± 2.89

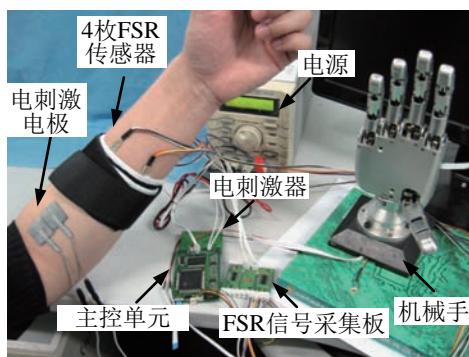
#### 4.2 盲抓取实验

在实验过程中，实验者首先重复五指抓取 (f5) / 伸展 (e5) 以及放松 (r) 这 3 种动作模式，控制机械手探索其抓取区域内是否有抓取物 (皮制橄

榄球, 如图 9(a) 所示). 当有人将抓取物放入机械手抓取区域后, 力矩传感器检测到抓取力, 并将其信号传递给主控单元, 然后经过由主控单元、电刺激器和刺激电极组成的感觉反馈通道, 向人体施加相应强度等级的电刺激信号, 从而使实验者获得抓握力感. 实验者由此判断是否抓到物体. 在抓到物体后, 实验者根据电刺激感的强弱改变机械手抓握力的大小, 并控制抓取物不脱落. 完成后放开抓取物. 实验时, 为了仅凭电刺激信号向实验者提供感觉反馈信息, 实现盲抓取的要求, 对实验者的视觉以及听觉分别通过眼罩和播放音乐进行屏蔽, 如图 9(a) 所示. 另外, 由于所需识别的动作模式简单, 为了便于数据分析, 在本实验中肌力信号采集通道仅使用了 4 枚 FSR 传感器, 其余部分与前述 HMI 系统保持一致, 见图 9(b).



(a) 实验者与抓取物设置



(b) 实验系统

图 9 盲抓取实验设置

Fig.9 Setting of the blind grasp experiment

图 10 显示了实验过程中采集的 FSR 传感器信号、动作模式识别结果 (黑色: 放松模式; 灰色: 五指抓取模式; 白色: 五指伸展模式)、机械手力矩传感器信号以及经过人体的电刺激信号. 从该图可以看出, 起初机械手与物体没有接触, 在第一次抓取动作开始  $\Delta t$  秒后, 机械手抓到了物体, 抓握力突然增高, 如图 10 中力矩信号所示. 当机械手握紧到预设手形的极限位置后, 抓取力达到最大,

实验者受到电刺激脉冲的密集刺激, 据此判断出抓取力度很大, 随即控制机械手稍稍放松, 将抓取力调整到适中的力度, 电刺激脉冲也相应变得稀疏. 之后, 受试者重复了握紧、放开的动作, 并根据自己的感受调整抓取力度, 但始终保持抓取物没有脱落. 调整完成后, 受试者完全放开物体, 物体脱落, 力矩信号回零.

实验结果表明, 实验者可以流畅准确地控制机械手动作, 还可根据电刺激反馈的抓握力感觉来判断机械手是否抓到物体, 同时还可对抓握力的大小进行调整并确保抓取物不脱落.

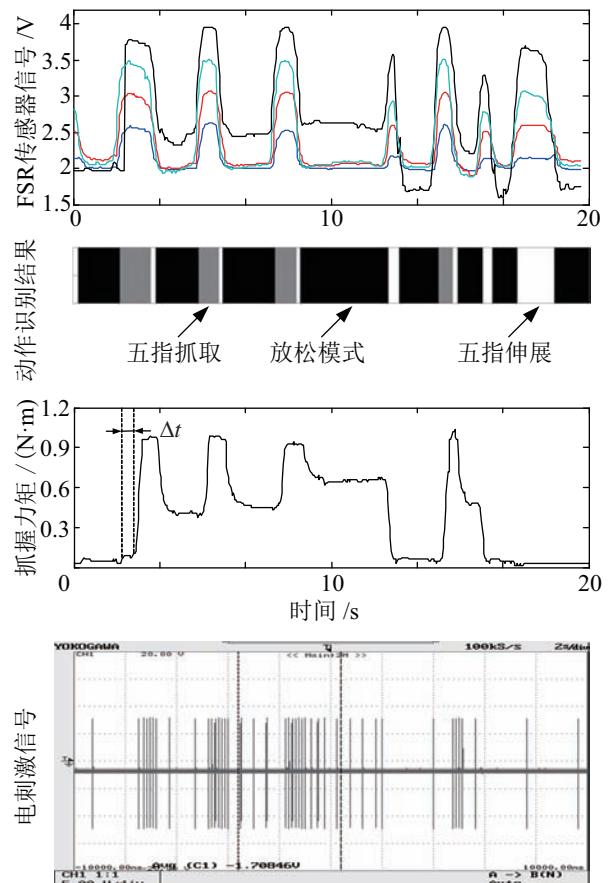


图 10 抓取过程中的 FSR 传感器信号、动作识别结果、抓取力矩信号和电刺激信号

Fig.10 FSR sensor signals, motion recognition output, torque signal and electrical stimulation signal during grasping

## 5 结论 (Conclusion)

本文基于对肌力信号的采集、识别和经皮神经电刺激原理构建了一种新型多自由度机械手 HMI 系统及控制方法. 该系统通过采用 SVM 算法构建多类分类器识别肌力信号的方法实现了对 10 种人手动作的识别; 通过将力矩传感器信号转换为电刺激脉冲刺激人体体表的方式实现了将机械手抓握力向人体的感觉反馈.

多动作模式识别实验表明, 该系统对 10 种人手动作的识别成功率可达 95%, 识别时间在 200 ms 内, 机械手按收到的动作模式码运动, 从而实现了对人手动作的跟随。

盲抓取实验表明, 该新型 HMI 系统成功实现了机械手与人体的双向信息传递, 可使操作者具备脱离视觉的抓取控制能力, 提高了对多自由度机械手的抓取操作水平。

在后续工作中将进一步提高手部动作的识别数量和成功率, 优化肌力信号的采集、特征提取和识别方法, 探索采用更多电刺激通道实现对机械手多种传感信息的感觉反馈方法。

## 参考文献 (References)

- [1] 樊绍巍, 刘伊威, 金明河, 等. HIT/DLR Hand II 类人形五指灵巧手机构的研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(2): 171-177.
- Fan S W, Liu Y W, Jin M H, et al. Research on the mechanics of the HIT/DLR hand II anthropomorphic five-finger dexterous hand[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(2): 171-177.
- [2] Johannes M S, Bigelow J D, Burck J M, et al. An overview of the developmental process for the modular prosthetic limb[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2011, 30(3): 207-216.
- [3] Doggett W R, Dorsey J T, Jones T C, et al. Development of a tendon-actuated lightweight in-space manipulator[C]//42nd Aerospace Mechanisms Symposium. Hampton, USA: NASA, 2014: 1-14.
- [4] Feng F, Liu Y W, Liu H, et al. Development of space end-effector with capabilities of misalignment tolerance and soft capture based on tendon-sheath transmission system[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3015-3030.
- [5] Carey M W, Kurz E M, Matte J D, et al. Novel EOD robot design with dexterous gripper and intuitive teleoperation[C]//World Automation Congress. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [6] 曾建军, 杨汝清, 张伟军. 有限人参与下的排爆机器人半自主抓取 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(8): 1238-1243.
- Zeng J J, Yang R Q, Zhang W J. Research of semi-automatic bomb fetching with limited support of human in explosive ordnance disposal robot[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(8): 1238-1243.
- [7] 李楠, 赵京东, 姜力, 等. 多自由度仿生假手嵌入式控制系统及其抓取策略 [J]. 机器人, 2011, 33(1): 22-27.
- Li N, Zhao J D, Jiang L, et al. Embedded control system for multi-DOF anthropomorphic prosthetic hand and its grasping strategy[J]. Robot, 2011, 33(1): 22-27.
- [8] Dalley S A, Varol H A, Goldfarb M. A method for the control of multigrasp myoelectric prosthetic hands[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2012, 20(1): 58-67.
- [9] 王家顺, 王田苗, 魏军, 等. 一种面向遥操作的新型数据手套研制 [J]. 机器人, 2000, 22(3): 201-206.
- Wang J S, Wang T M, Wei J, et al. Development of a new telemanipulation-oriented data glove[J]. Robot, 2000, 22(3): 201-206.
- [10] Fang H G, Xie Z W, Liu H. An exoskeleton master hand for controlling DLR/HIT hand[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 3703-3708.
- [11] Yang D P, Zhao J D, Gu Y K, et al. An anthropomorphic robot hand developed based on underactuated mechanism and controlled by EMG signals[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(3): 255-263.
- [12] Tenore F V G, Ramos A, Fahmy A, et al. Decoding of individuated finger movements using surface electromyography[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2009, 56(5): 1427-1434.
- [13] Honda Y, Weber S, Lueth T C. Intelligent recognition system for hand gestures[C]//3rd International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 611-614.
- [14] Fang H G, Xie Z W, Liu H, et al. An exoskeleton force feedback master finger distinguishing contact and non-contact mode[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1059-1064.
- [15] 袁明. 肌电仿生控制与遥操作研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- Yuan M. Myoelectric bionic control and tele-operation research[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.
- [16] 梅旭红. 基于网络和无线传输的机器人肌电控制 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- Mei X H. The SEMG control of telerobot based on network and wireless[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2012.
- [17] Blum J E. Using force sensors to effectively control a below-elbow intelligent prosthetic device[EB/OL]. (2012-03-31) [2015-04-18]. <http://jeremyblum.com/wp-content/uploads/2008/11/CONTROLLING-AN-INTELLIGENT-PROSTHETIC-DEVICE.pdf>.
- [18] Kaczmarek K A, Webster J G, Bachyrita P, et al. Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1991, 38(1): 1-16.
- [19] McNeal D R. Analysis of a model for excitation of myelinated nerve[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1976, 23(4): 329-337.
- [20] Hsu C W, Lin C J. A comparison of methods for multiclass support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(2): 415-425.
- [21] Englehart K, Hudgins B. A robust, real-time control scheme for multifunction myoelectric control[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2003, 50(7): 848-854.

## 作者简介:

- 李 楠 (1982-), 男, 博士, 工程师. 研究领域: 仿生机器人, 嵌入式控制系统, 导航制导与控制.
- 刘 波 (1976-), 男, 硕士, 高级工程师. 研究领域: 控制系统综合设计, 导航制导与控制.
- 霍 宏 (1986-), 女, 硕士, 工程师. 研究领域: 计算机应用, 嵌入式软件设计, 导航制导与控制.