

基于织物拉伸传感器的手势映射系统*

张阳阳, 黄英, 郝超, 郭小辉, 刘平

(合肥工业大学大学电子科学与应用物理学院 合肥 230009)

摘要:针对人机交互中主从手映射系统反馈信息缺乏、映射精确度及可穿戴性差等存在的缺点,提出一种基于织物可拉伸传感器以及具有反馈机制的主从手映射操控系统。以莱卡织物表面旋涂石墨烯/聚苯胺复合导电材料,有机硅导电银胶作为电极,研制一种全柔性织物可拉伸传感器。同时将该拉伸传感器布置于人手及机械手,构成 2×5 的拉伸传感阵列。结合主从手拉伸传感信息,通过改进D-H算法,建立手势识别模型。利用BP神经网络对主从手拉伸传感器信息映射进行离线建模,结合在线优化算法,引入拉伸传感器信息反馈机制,实现主从手交互手势的高效、精准映射,建立具有反馈机制的手势映射系统。通过实验分析传感器的拉伸特性,并对有、无反馈机制的手势映射系统的映射精确度进行对比实验。结果表明,所设计的基于柔性织物拉伸传感器、具有反馈机制的主从手映射系统提升了手势映射的精确度,并兼具良好的穿戴性。

关键词: 拉伸传感器; 织物; D-H算法; 反馈机制; 手势映射系统

中图分类号: TH702 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: TP212

Gestures mapping system based on fabric strain sensor

Zhang Yangyang, Huang Ying, Hao Chao, Guo Xiaohui, Liu Ping

(School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Current master-slave hand mapping in the human-computer interaction has shortcomings such as lack of feedback, poor mapping accuracy and poor wearability. A master-slave mapping system based on fabric strain sensor and feedback mechanism is presented to address these issues. The strain sensitive unit is constituted of Lycra fabric surface spinning graphene/polyaniline composite conductive materials, in which the silver conductive adhesive is used as the electrode. The fabric strain sensor is layout in master-slave hand to construct 2×5 array. The gesture recognition model is obtained by combining stretch sensor information and the improved D-H algorithm. The BP neural network is used to model the information of the master-slave strain sensor. Combining with the online optimization algorithm, the feedback mechanism of the strain sensor is introduced to realize the efficient and accurate mapping of the master-slave hand gestures, and the gesture mapping with feedback mechanism is established. The strain characteristics of the sensors are tested and the mapping accuracy of the gesture mapping system with and without feedback mechanism is compared. The experimental results indicate that the master-slave control system based on fabric strain sensor and feedback mechanism can improve mapping precision and wearability.

Keywords: strain sensor; fabric; D-H algorithm; feedback mechanism; gesture mapping system

0 引言

随着科技的进步、人们生活水平的提高及人们对机器人技术智能化认识的加深,机器人技术已经向医

疗^[1-2]、教育^[3]等人类活动的各个领域渗透。结合不同领域的应用特点,发展出各类型具有感知、决策、行动和交互能力的智能机器人。近年来,为提升人机交互的精准性、智能性与可穿戴性,实现在复杂动态环境下与人的协同作业,应用于具有主从手手势识别、映射、反馈的机器

人成为研究热点^[4-11]。计算机视觉技术在姿态识别应用中已较为成熟^[12-13],此外,通过佩戴各种传感设备(如姿态跟踪器、陀螺仪等)也可实现姿态识别与追踪^[14]。然而,在地下深处、深海、太空等特殊环境下,上述姿态识别^[15-17]方法因受操作空间、光线以及穿戴便携性等因素限制,很难满足虚拟装配以及智能抓取等应用领域中人机交互灵巧性、安全性的要求,并且缺乏对人手与机械手势映射程度的判断及优化。为此,包括柔性可拉伸传感器、柔性电极、信息反馈机制及手势映射算法的研究在人机交互中的主从手势映射成为科研人员关注的热点^[18-19]。Suzuki K等人^[20]设计了一种基于多壁碳纳米管和聚合物纤维的可拉伸传感器进行手势识别,实现人手势的捕捉;Li CH等人^[21]介绍了一种基于碳纳米管(carbon nanotube, CNT)-array 双重螺旋应变传感器的手势识别及机械手控制系统,将拉伸传感阵列置于人手关节处上实现手势识别以及机械手控制系统。上述拉伸传感器的基体缺乏透气、全柔性的特点,与人体常用穿戴织物无法完美结合。而且系统缺少反馈机制,在机械手上并没有布置传感器,无法实现主从手势实时反馈对比优化。

基于织物的拉伸传感器具有透气、全柔性等优点,能够很好地与常用织物完美结合,具备穿戴舒适性的优点。针对现有人机交互中主从手映射系统存在反馈信息缺乏、映射精准度及可穿戴性差等缺点,本文提出一种基于织物拉伸传感器的具有反馈机制的主从手势映射系统,建立基于拉伸特征的交互手势识别模型。通过对拉伸传感单元及传感阵列进行特性测试,以及有、无反馈机制的手势映射系统的映射精准度进行对比实验,验证了该织物拉伸传感器用作人机交互中主从手势映射的可行性及具有反馈机制的手势映射系统的精准性,为可靠实现主从手势的高效、精准映射提供了有力的技术保障及理论支撑。

1 柔性拉伸传感器设计

1.1 传感器制备

碳系导电材料与聚合物导电材料两相填料并用所形成的协同效应有利于复合导电材料建立稳定的电学网络,通过对碳系导电材料进行表面活性剂处理能够进一步提高复合导电材料在基体中的分散性。此外,柔性可拉伸织物基体不仅具有良好的机械性能,其高柔弹性和透气性等特点也为设计穿戴舒适型高性能织物拉伸传感器提够了保障。

在莱卡织物表面旋涂石墨烯/聚苯胺复合导电材料研制柔性可拉伸传感器,图1所示为拉伸织物传感的结构示意图,传感器总尺寸长×宽×高为40 mm×5 mm×1.6 mm。莱卡织物作为柔性基体,质量分数比为2:7:2

的聚苯胺、石墨烯填充硅橡胶为拉伸传感器的弹性电介质。YC-2型有机硅导电银胶常温下固化后具有良好的弹性、可拉伸性及成膜性等优点,因此选作为电极材料。最外层包裹一层聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)柔性保护膜,以提高传感器的使用寿命。柔性可拉伸传感器制备流程如图2所示,采用溶液共混法,通过将石墨烯与聚苯胺导电填料均匀分散于无水乙醇中并加入表面活性剂,经超声分散/磁力搅拌后得到石墨烯/聚苯胺复合溶液,通过在莱卡织物基体表面均匀旋涂以制备柔性织物拉伸传感器。

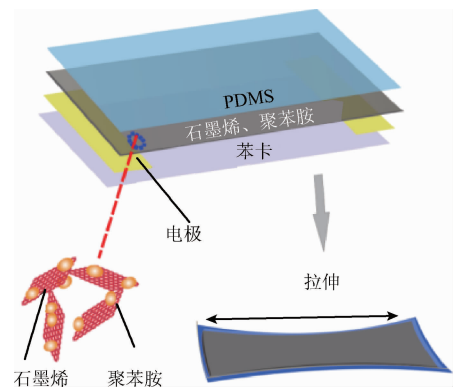


图1 传感单元结构

Fig. 1 Structure of sensor unit

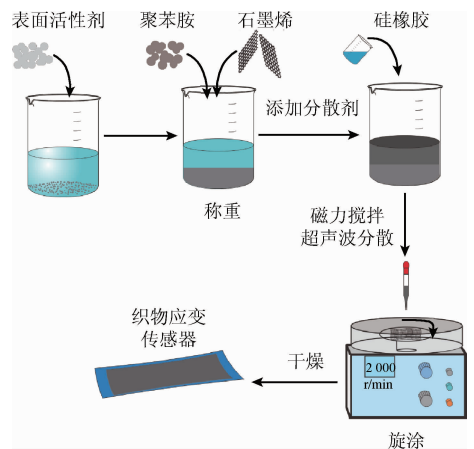


图2 传感单元制备流程

Fig. 2 Preparation flow of sensing unit

1.2 拉伸传感器阵列及信息处理系统设计

为实现织物拉伸传感器在人机交互中主从手具备可穿戴性、信息提取全面性等功能,将全柔性织物可拉伸传感单元布置成为 2×5 阵列结构,其单元分布、阵列拓扑结构如图3所示。织物拉伸传感器具有在关节处贴附性好、易于阵列设计等特点,实现真正意义上的可穿戴、灵活布置、信息全面感知。



图3 织物可拉伸传感阵列

Fig. 3 Fabric stretch sensor array

传统方法通过分立元件将电阻信号转化为电压、电流存在电路设计复杂、测量精度不高、工作频率受限等诸多缺点。目前,数据采集卡在信号提取方面已经成熟应用。文中选用由 INSTRUMENTS 公司推出的支持 LABVIEW 的 AD 采集卡 NI USB-6211。LABVIEW 具备强大的实时数据处理功能与显示功能,其内部自带的函数库能方便地对数据进行更高级的运算和处理^[22]。在 LABVIEW 前面板上便于区分独立传感器输出特性,具有数据可视化特点,很大程度上提高了测试效率。终端节点与阵列传感器组成一体化便携式结构,采集到的电学信息一方面将传感信息发送至上位机图形化显示实验结果,另一方面通过串口发送主从手控制指令,以实现人机交互中主从手之间通信,信息提取及处理软硬件系统如图4所示。

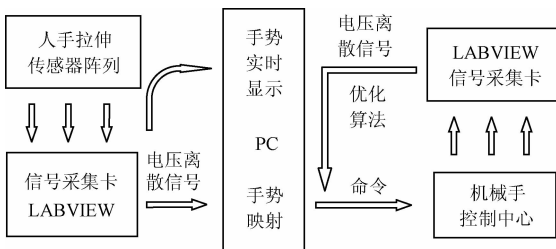


图4 信号提取与处理框图

Fig. 4 Block diagram of signal extraction and processing

2 手势识别及映射

2.1 手势识别模型

将高性能织物拉伸传感器布设在手指弯曲关节处,依据拉伸传感器的输出量与弯曲状态之间的函数关系,通过对 D-H 算法^[23]进行改进,确定拉伸传感器输出量与手指关节空间位置关系,根据关节空间位置坐标递推关系式,获得各关节的空间位置坐标,建立基于拉伸特征的手势识别模型,如图5所示。

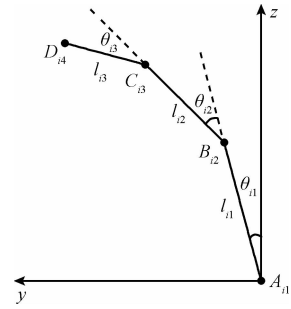


图5 交互手势的空间位置模型

Fig. 5 Spatial position model of interactive hand gesture

设定各关节在所处平面内自由运动,手指起始关节点坐标和各点横坐标为标定数据, l 是各关节长度(已知值), $i=1,2,\dots,5$,分别代表由大拇指开始的5个手指,各手指关节点坐标满足式(1)和(2)。

$$\begin{bmatrix} Y_{B_i} \\ Y_{C_i} \\ Y_{D_i} \end{bmatrix} = [l_{i1} \quad l_{i2} \quad l_{i3}] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_{i1} & \sin\theta_{i1} & \sin\theta_{i1} \\ 0 & \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2}) & \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ 0 & 0 & \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2} + \theta_{i3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{B_i} \\ Z_{C_i} \\ Z_{D_i} \end{bmatrix} = [l_{i1} \quad l_{i2} \quad l_{i3}] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_{i1} & \cos\theta_{i1} & \cos\theta_{i1} \\ 0 & \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2}) & \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ 0 & 0 & \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2} + \theta_{i3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\theta_{i3} = 2\theta_{i2}/3$ 。改进 D-H 算法,利用 MATLAB 进行交互手势空间位置仿真,实现交互手势实时显示,为后期构建基于拉伸特征的高效、直观的主从手手势映射系统提供了基础。

2.2 映射算法

对传感器输出电压进行采样,获取主、从手拉伸传感器阵列电压信息矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n}$ 、 $\mathbf{B}_{m \times n}$ 。根据手势姿态识别模型,将拉伸传感阵列电压信息矩阵转变为弯曲角度状态矩阵 $\hat{\mathbf{A}}$ 、 $\hat{\mathbf{B}}$ 。基于反向传播(back propagation, BP)神经网络非线性映射理论,求解 $\hat{\mathbf{A}} \rightarrow \hat{\mathbf{B}}$ 相同角度时,电压之间的传输系数 \mathbf{K} ,如式(3)、(4)所示。

$$\hat{\mathbf{B}}_{m \times n} = \mathbf{K} \hat{\mathbf{A}}_{m \times n} + \mathbf{R} \quad (3)$$

式中: \mathbf{R} 为优化补偿项。

利用神经网络深度学习,多次迭代得到传输矩阵 \mathbf{K} 。基于式(4)的误差迭代,利用神经网络工具箱对隐含层数和节点数进行仿真,得到最优神经网络结构,获得满足精度的传输矩阵 \mathbf{K} 。

$$\mathbf{K}(t+1) = \mathbf{K}(t) - \eta \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{K}}, \mathbf{E} = \hat{\mathbf{B}} - \hat{\mathbf{A}} \quad (4)$$

由于机械手控制系统存在误差以及外界因素的影响,映射过程存在系统误差,利用以下算法进行误差在线校准。

基于已获取的状态矩阵及传输矩阵,通过对比主从手拉伸传感器状态矩阵,定量分析映射程度并优化传输矩阵,能够实现机械手姿态与人手姿态协同,算法如式(5)~(7)所示。 θ_{ij} 和 θ'_{ij} 分别为人手、机械手关节角度, $i=1,2,\dots,5$ 为从拇指开始的5个手指, $j=1,2$ 分别为第1和第2指关节。如果:

$$\sqrt{\frac{(\theta_{i1} - \theta'_{i1})^2}{2} + \frac{(\theta_{i2} - \theta'_{i2})^2}{2}} \leq \varepsilon$$

$$i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2 \tag{5}$$

式(5)则满足精度。

如果:

$$\frac{\theta_{i1} + \theta_{i2}}{2} \geq \frac{\theta'_{i1} + \theta'_{i2}}{2} \quad i = 1, 2, \dots, 5 \tag{6}$$

式(6)为欠驱动状态,令 $\theta_{i1} = \theta_{i1} + \theta_{i1} \times 0.618$,直到满足式(5),如果:

$$\frac{\theta_{i1} + \theta_{i2}}{2} \leq \frac{\theta'_{i1} + \theta'_{i2}}{2}, i = 1, 2, \dots, 5 \tag{7}$$

式(7)为过驱动状态,令 $\theta_{i1} = \theta_{i1} - \theta_{i1} \times 0.618$,直到满足式(5)。基于非线性映射及优化理论,建立良好的交互手势,实现交互手势同步映射,提升主从手手势映射精度。

3 实 验

使用 TH-2515 型直流电阻表测得该拉伸传感器的拉伸特性,图6所示为以石墨烯、聚苯胺为敏感材料制备的拉伸传感器的拉伸特性。可以看出,传感器输出电阻对应变的响应及灵敏度良好,且3次测量结果具有较稳定的重复性。拉伸特性显示,传感器输出电阻与拉伸应变服从分段线性的关系。图6中小窗口曲线表明,在小应变范围内,传感器输出电阻与拉伸应变接近线性的关系,重复性精度小于或等于1.00%。图7所示为传感器的响应时间特性曲线,响应时间为150 ms。图8所示为传感器在550 s内,拉伸10%时的动态响应特性曲线。

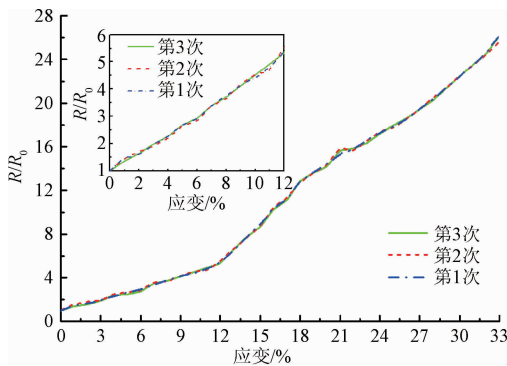


图6 传感器应变与输出相对电阻间的关系
Fig.6 Relationship between sensor strain and output relative resistance variation

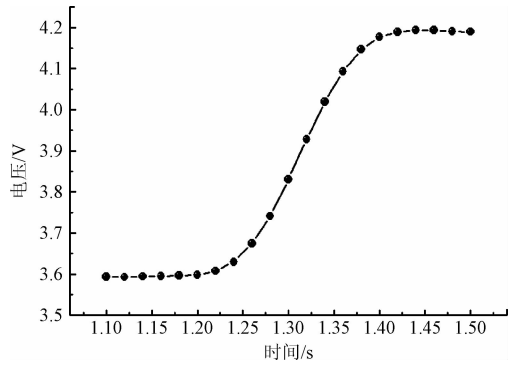


图7 传感器响应时间特性
Fig.7 The response time of the sensor

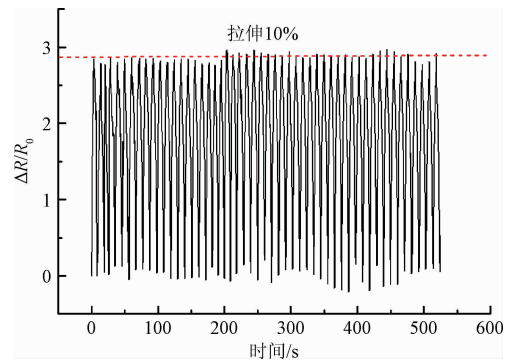


图8 传感器动态响应特性
Fig.8 The dynamic response curve of the sensor

为实现主从手势的精准映射,构建包含稳压电源、信号采集电路、上位机、数据手套、机械传动5指机械手这5个部分的实验平台,其实验系统如图9所示。将已布置2×5传感阵列的数据手套穿戴于人左手,以及将传感单元布置于机械手。通过信号采集卡、LABVIEW和信号采集电路采集主从手传感器输出电学信息,利用D-H算法和MATLAB软件实现人手手势识别及上位机手势实时显示,同时基于主从手输出电学信息、手势映射模型及LABVIEW编程对机械手手势进行精准控制,实现主从手手势的精准映射。

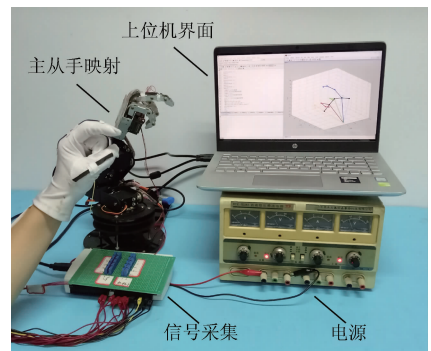


图9 主从手手势映射系统实验平台
Fig.9 The experiment platform of master-slave hand gesture mapping system

图 10 所示为上位机手势识别系统实时显示结果,图 10(a) ~ (e) 对应图 11 中的手势序号 1 ~ 5, 基于 MATLAB 的仿真结果验证了手势识别模型的可行性, 为手势映射系统提供了可视化的基础。

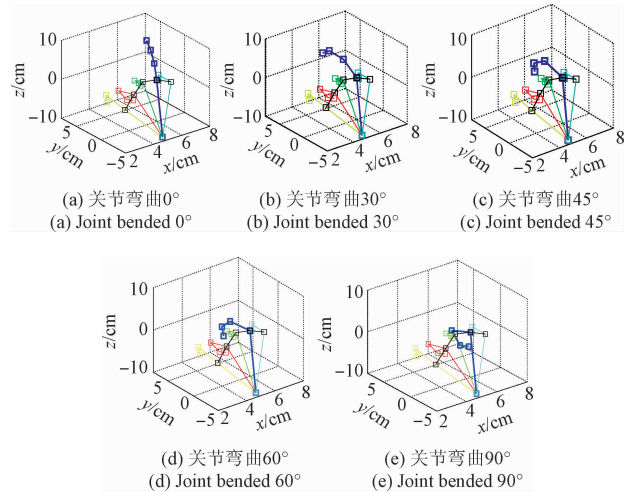


图 10 人手手势上位机实时显示

Fig. 10 Real-time display of hand gesture on PC

如图 11 所示, 通过已布置传感器阵列的数据手套穿戴人手、以及已布置传感器单元的机械手进行交互手势, 机械手为五指机械传动机械手, 关节数量与人手一致。机械手指分别由一个齿轮和齿条驱动, 带动机械手指弯曲, 齿轮旋转精度为 3°, 保证了机械手指弯曲角度的精确度小于或等于 1°。通过人手进行 5 个连续弯曲手指的动作并重复一次, 机械手映射人手弯曲的动作, 验证了手势识别模型, 测试机械手的映射响应, 关节弯曲角度分别为 0°、30°、45°、60°、90°。由图 11 可知, 基于织物拉伸传感器阵列的手势映射系统实现了主从手的手势协同。



图 11 1~9 和 I~IX 为人手、机械手手势映射

Fig. 11 Master-slave hand gesture mapping

使用 TH-2515 型直流电阻表以及数显万能角器对可拉伸传感单元在 0° ~ 90° 范围内进行标定, 标定间隔为 10°。数显万能角器的测量精度为 0.1°, 织物可拉伸传感器的弯曲角度与应变之间的关系如图 12 所示, 织物拉伸传感器应变的分辨率为 0.85%, 对应角度的测量精度为 10°。图 13 所示为主从手拉伸传感器输出与关节弯曲角度间的标定曲线。可知, 本实验中机械手拉伸传感器输出的相对电阻大于人手拉伸传感器输出的相对电阻, 这是由主从手关节结构参数不同所决定。主从手拉伸传感器输出相对电阻与关节弯曲角度之间满足分段线性关系, 分段区域为 I ~ IV。基于此特点, 建立分段训练的神经网络模型, 求解映射系数。图 14 所示为主从手映射离线建模中传输系数随关节弯曲角度变化的关系, 主从手映射系数存在先上升后下降的变化趋势, 揭示了本实验中主从手传感器输出相对电阻在 30° 左右差异达到最大, 为后期主从手微操控具有指导性意义。

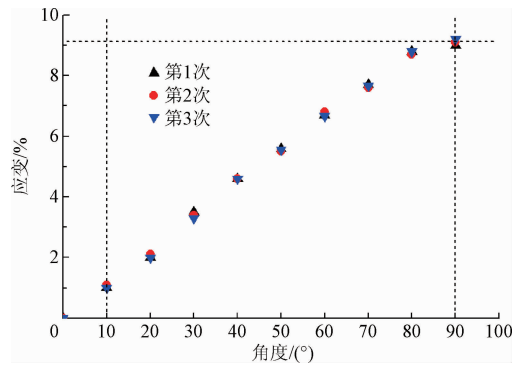


图 12 传感器应变与弯曲角度间的关系

Fig. 12 Relationship between sensor strain and angle of bending

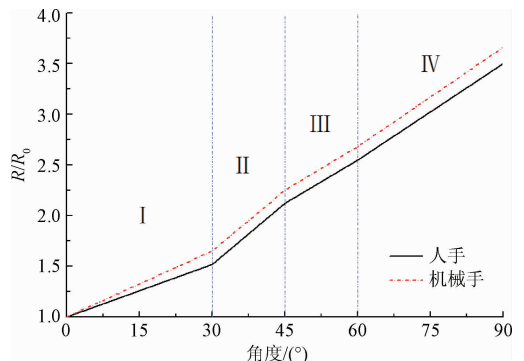


图 13 传感器标定曲线

Fig. 13 Calibration curve of the sensors

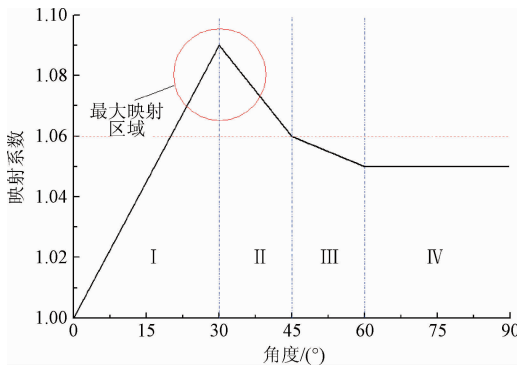


图 14 主从手映射系数

Fig. 14 Mapping coefficient of master-slave hand gesture

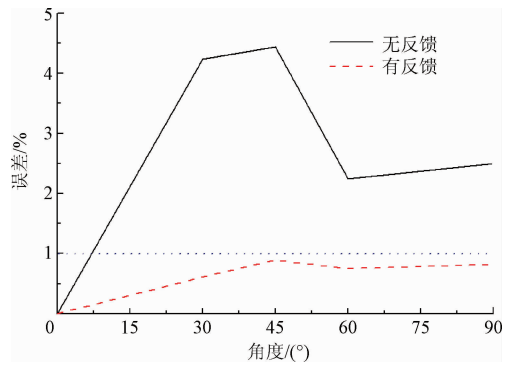


图 16 映射误差

Fig. 16 Mapping errors

主从手映射模式下的人机交互,其本质在于交互信息的双向传递,这就体现了机械手传感器输出信息反向传递的重要性。图 15 所示为引入反馈机制和无反馈机制时,主从手关节弯曲角度在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的映射曲线对比。可知,引入反馈系统时,人手与机械手映射相比无反馈机制更具有一致性和稳定性。由于机械手机械控制部分存在误差,以及神经网络分段映射带来的影响,导致机械手不能完全达到驱动信号所对应的关节弯曲角度,导致无反馈机制时,主从手手势映射误差较大。在此设定在线优化精确度阈值 $\varepsilon = 1.00\%$,通过机械手输出相对电阻与机械手标定数据之间的差值计算映射误差,其误差对比如图 16 所示,引入反馈机制的手势映射系统映射精度可控制在 1.00% 以内。实验结果表明,引入反馈机制提高了主从手映射的精准度和稳定性。

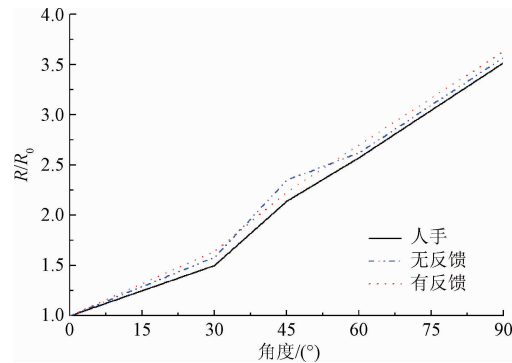


图 15 有、无反馈系统的主从手映射对比

Fig. 15 Mapping comparison of the feedback system

具有反馈机制的主从手手势映射响应过程曲线如图 17 所示,主从手手势映射效果良好,动作过程统一。阶段 5 存在两个延迟点,原因为大角度映射过程中,机械手驱动的调整需要一定的稳定时间。表 1 所示为具有反馈机制及在线优化算法的机械手映射实验结果及误差分析,通过计算各阶段 10 s 内传感器输出的平均值作为该

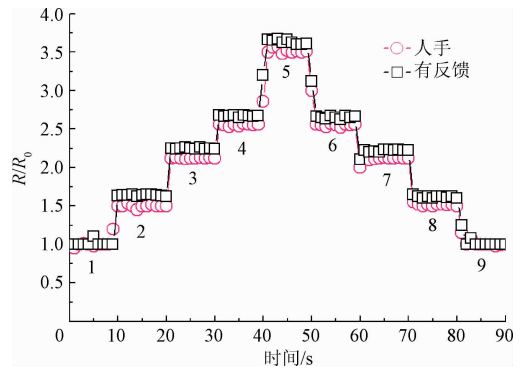


图 17 具有反馈机制的主从手手势映射响应过程

Fig. 17 Mapping process of master-slave hand gesture with a feedback system

阶段机械手传感器的输出。从表 1 中可知,主从手手势映射 1~9 过程中,机械手传感器的实际输出与标定数据之间的误差小于 1.00% ,具有反馈机制及在线优化算法的手势映射系统能够弥补机械手本身过驱动及欠驱动的缺点。实验结果表明,基于织物拉伸传感器构建具有反馈机制的主从手手势映射系统可行,且相比无反馈机制的手势映射系统,提高了手势映射的精准度及稳定性。

表 1 机械手映射实验结果及误差

Table 1 Experimental results of mechanical hand mapping and errors analysis

映射阶段	人手关节弯曲角度/ $(^{\circ})$	传感器标定 R/R_0	传感器输出 R/R_0	相对误差/ $\%$
1	0	1.00	1.00	0
2	30	1.52	1.53	0.60
3	45	2.22	2.24	0.90
4	60	2.66	2.68	0.75
5	90	3.69	3.72	0.81
6	60	2.66	2.67	0.38
7	45	2.22	2.24	0.90
8	30	1.52	1.51	0.60
9	0	1.00	1.00	0

4 结 论

本文提出了一种基于织物拉伸传感器的具有反馈机制的主从手手势映射系统。该系统可用于人机交互中主从手映射操控,具有较好的精准度和稳定性。分别对织物拉伸传感器、手势识别模型、手势映射算法、反馈机制进行了研究,并给出整个手势映射系统。分析了织物拉伸传感器的拉伸特性,解析了基于改进后 D-H 算法的手势识别模型并给出仿真。阐述了反馈机制在主从手映射系统中的应用原理,对比了有、无反馈机制的主从手手势映射系统的映射特性。通过引入反馈机制,结合在线优化算法,提升了映射精准度。实验结果验证了所设计的基于织物拉伸传感器且引入反馈机制的整个主从手手势映射系统在映射操控过程中的精准性、一致性和稳定性。

参考文献

- [1] WANG X, GU Y, XIONG Z, et al. Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(9): 1336-1342.
- [2] 张小瑞,孙伟,宋爱国,等. 双通道力/触觉交互的虚拟肺手术仿真系统[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(2): 421-428.
ZHANG X R, SUN W, SONG AI G, et al. Virtual lung surgery simulation system for dual channel force/tactile interaction[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 421-428.
- [3] ŠTUIKYS V, BURBAITE R, BESPALOVA K, et al. Model-driven processes and tools to design robot-based generative learning objects for computer science education[J]. *Science of Computer Programming*, 2016, 129(C): 48-71.
- [4] TRUNG T Q, LEE N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4338-4372.
- [5] AMIADI M, KYUNG K U, PARK I, et al. Stretchable, skinmountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 26(11): 1678-1698.
- [6] SONG Y, DEMIRDJIAN D, DAVIS R. Continuous body and hand gesture recognition for natural human-computer interaction [J]. *Acm Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2015, 2(1): 1-28.
- [7] 何慧娟,王雷,许德章. 柔性触觉传感器在机器人上的应用综述[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(11): 5-7.
HE H J, WANG L, XU D ZH. Application of flexible tactile sensors in robots [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(11): 5-7.
- [8] 黄启友,藏永,胡明清,等. 基于陀螺传感器的三维手势识别方案[J]. *计算机工程*, 2011, 37(22): 153-155.
HUANG Q Y, ZANG Y, HU M Q, et al. A three-dimensional hand potential recognition scheme based on gyro sensor[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(22): 153-155.
- [9] GUO X, HUANG Y, ZHAO Y, et al. Highly stretchable strain sensor based on SWCNTs/CB synergistic conductive network for wearable human-activity monitoring and recognition [J]. *Smart Materials & Structures*, 2017, 26(9): 095017.
- [10] 王晓华,李才顺,胡敏,等. 服务机器人手势识别系统研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(4): 305-311.
WANG X H, LI C SH, HU M, et al. Research on gesture recognition system of service robot[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(4): 305-311.
- [11] 王真水,李琳,刘晓平. 支持自定义的多粒度动态手势识别方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(4): 416-423.
WANG ZH SH, LI L, LIU X P. Research on the identification of multi-granularity dynamic hand potential of self-definition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2014, 28(4): 416-423.
- [12] GHOSH D K, ARI S. On an algorithm for vision-based hand gesture recognition [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2016, 10(4): 655-662.
- [13] LIU K, KEHTARNAVAZ N. Real-time robust vision-based hand gesture recognition using stereo images [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2016, 11(1): 1-9.
- [14] RHEE K W, YOU K J, SHIN H C. Recognition of finger motion with sEMG and gyrosensor signals [J]. *Journal of Measurement Science & Instrumentation*, 2011, 2(2): 136-139.
- [15] 顾伟宏,闵昆龙,张晓娜. 新型数据手套及其手势识别研究 [J]. *自动化仪表*, 2011, 32(2): 56-58.
GU W H, MIN K L, ZHANG X N. New data glove and gesture recognition research [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2011, 32(2): 56-58.
- [16] 杨阿妮,常丹华. 神经网络与马尔可夫模型的手势识别系统 [J]. *电子测量技术*, 2010, 33(4): 60-64.
YANG A N, CHANG D H. Signal recognition system of neural network and markov model [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(4): 60-64.

- [17] 侯亭亭,肖秦琨,杨永侠. 基于动态贝叶斯网络的手势识别[J]. 国外电子测量技术,2015,34(1):36-39.
HOU T T, XIAO Q K, YANG Y X. Gesture recognition based on dynamic bayesian network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2015,34(1):36-39.
- [18] HUANG Y, WANG Y, GAO L, et al. Characterization of stretchable SWCNTs/lycra fabric electrode with dyeing process [J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2016, 28 (5): 4279-4287.
- [19] 郭小辉,黄英,毛磊东,等. 可穿戴式电子织物仿生皮肤设计与应用研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(4):938-944.
GUO X H, HUANG Y, MAO L D, et al. Research on bionic skin design and application of wearable electronic fabrics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(4):938-944.
- [20] SUZUKI K, YATAKA K, OKUMIYAK Y, et al. Rapid-response, widely stretchable sensor of aligned M-WCNT/Elastomer composites for human motion detection [J]. ACS Sensors, 2016, 1(6): 817 - 825.
- [21] LI C, CUI Y L, TIAN G L, et al. Flexible CNT-array double helices strain sensor with high stretchability for motion capture [J]. Scientific Reports, 2015, 13 (5): 15554.
- [22] CHOONG C L, SHIM M B, LEE B S, et al. Highly stretchable resistive pressure sensors using a conductive elastomeric composite on a micropyramid array [J]. Advanced Materials, 2014, 26 (21): 3451-3458.

- [23] DU M, WANG J, WANG L, et al. A research on autonomous position method for mobile robot manipulator based on fusion feature [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2013, 69(16): 1447-1452.

作者简介



张阳阳,2013年于西安电子科技大学获得学士学位,现为合肥工业大学博士研究生,主要研究方向为敏感电子学与传感技术、机器人敏感皮肤。

E-mail:1320696987@qq.com

Zhang Yangyang received his B. Sc. degree from Xidian University in 2013. Now he is a Ph. D. candidate in Hefei University of Technology. His main research interests include sensitive electronics and sensing technology, and robotic sensitive skin.



黄英(通讯作者),分别在1982年和2008年于合肥工业大学获得学士学位和博士学位,现任合肥工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为敏感材料与传感技术、机器人敏感皮肤。

E-mail:hf.hy@163.com

Huang Ying (Corresponding author) received her B. Sc. and Ph. D. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 2008, respectively. Now she is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of Technology. Her main research interests include sensitive electronics and sensing technology, and robotic sensitive skin.