

数据手套用柔性传感系统及信号特征分析技术

黄 辰^{a,b} 胡吉永^{a,b}

东华大学 a. 纺织学院, b. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620

摘要: 对数据手套采集信息的各组成部件进行归纳, 总结数据手套中的传感系统, 重点探讨柔性传感器的制备和传感阵列在手套中的集成。综述数据手套在不同应用场景下对采集信号的处理模式, 特别介绍深度学习及神经网络计算方法在手势识别中的研究进展。最后, 总结数据手套需突破的问题及未来发展趋势。

关键词: 人机交互; 数据手套; 纺织基传感器; 信号采集处理; 信号特征提取

中图分类号: TS 106

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)05-0001-09

Flexible sensing systems and signature feature analysis techniques for data gloves

Huang Chen^{a,b}, Hu Jiyong^{a,b}

a. College of Textiles, b. Key Laboratory of Textile Science and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The components of data gloves collecting information were concluded, the sensor systems in data gloves were summarized, including the preparation of flexible sensors and the integration of sensor array in the gloves. The processing modes of data gloves for the collected signals in different application scenarios were reviewed, and the research progress of deep learning and neural network computing methods in gesture recognition was particularly introduced. Finally, the problems to be broken through and the future development trend of data gloves were summarized.

Keywords: human-computer interaction; data glove; textile based sensor; signal acquisition processing; signal feature extraction

随着物联网技术的发展和人机交互系统的不断升级,越来越多的可穿戴智能设备被用于人类生活中,以期改善人们的日常交互体验。其中,应用于手部的智能设备受到了极大的关注,这与日常生活中手被用于执行大量的操作和交流任务分不开。手套

穿戴方便,且能覆盖手部所有的活动关节,故基于手套的智能设备是一种应用前景良好的人机接口。随着通信技术、神经计算、深度学习等计算机科学技术的进步,数据手套能够将采集到的动作信号更加准确地翻译成计算机语言,以适用于不同的使用环境。

基金项目:上海市自然科学基金(22ZR1400800)

收稿日期:2023-11-17

作者简介:黄辰,男,1999年生,在读硕士研究生,主要研究方向为纺织数据手套的设计与评价

通信作者:胡吉永,教授,hujiy@dh.u.edu.cn

根据相应的感测元件,现有手部姿态识别方式主要分2种:可穿戴式数据手套和基于计算机视觉的手部姿态识别。可穿戴式数据手套采用专用的传感器直接捕获手部关节的弯曲角度信息;而基于计算机视觉的手部姿态识别由相机捕获手部的姿态图像,再采用复杂的图像处理算法导出手部关节的位置及手部姿态。Chen等^[1]综述了这2种手部姿态识别方式,指出:可穿戴式数据手套的主要优点在于,手套中的传感器可以直接采集重要的和所需的数据(如弯曲角度等),并根据电压值向计算设备发送数据;而计算机视觉系统要求手部在移动相机监测下运动,无遮挡或无视野限制,因此只能在特定实验室中进行数据采集。Ahmed等^[2]将可穿戴数据手套信号采集系统归纳为3个部分,即输入单元(传感器)、处理单元(微控制器)和输出单元(显示器)。但目前有关数据手套中信号采集系统的集成、信号的处理和特征信号的识辨等研究较少。

数据手套中负责采集动作信号的部件是分布在手套中的传感器。不同传感机制的传感器被用于不同用途的数据手套中。Rashid等^[3]总结了康复手套中用于准确量化手指关节角度的传感器类型,它们分别是:电阻式弯曲传感器,其嵌入可拉伸手套中用于手关节的测量;加速度计,其放置在手套中以提供精确的方位数据;霍尔效应传感器,其用于精确测量手指近端关节的屈曲-伸展运动和内收-外展运动;拉伸传感器,其基于拉伸和挤压应变精确测量手指和关节的运动;磁场传感器,其用于跟踪手的位置和方向。Ozioko等^[4]归纳了言语障碍及听障人士用于日常交流的2种数据手套——基于触摸的数据识别手套(主要使用压力传感器)和基于手势的数据识别手套(主要使用弯曲传感器和拉伸传感器)。据此可知,数据手套尽管应用场景不同,选择的传感器类型不同,但通常都是基于检测手或手指的弯曲角度或压力,并通过传递这些动作信号进行手部行为识别的。此外,带有这些功能传感器的数据手套还能被用于其他交互操作中,包括虚拟现实(VR)/增强现实(AR)交互、辅助技术^[5-6]等。作为人机交互的媒介,数据手套应具备穿戴轻便、柔软贴合等特性。且随着材料科学的进步,已有许多柔性传感器^[7]应用于数据手套中,它们具有更好的适形性和柔性。然而,目前有关数据手套中柔性传感器,尤其

是纺织基传感器的制备、集成及其应用性能研究较少。

本文将在介绍数据手套组成的基础上,重点概述满足不同应用的传感器尤其是纺织基传感器的类型及制备方式,总结传感电路互联及其在手套中的集成方式。其次,对现有数据手套信号特征提取所使用的方法等进行对比。最后,分析概括目前纺织基数据手套产业化所面临的挑战及未来的发展方向。

1 数据手套中的传感系统

对于数据手套,传感阵列是追踪、监测手势及行为变化的重要器件,它决定了数据手套捕捉佩戴者手部行为变化的准确性。传感阵列的设计和排布在数据手套整体性和一体化集成中占据很大的份额。手套中传感阵列的制备包括传感器的制备及传感阵列在手套中的集成。

1.1 传感器的选择与制备

传感器设计时应考虑数据手套的使用场合。例如,检测手关节灵活度及评估手部健康的辅助手套,所使用的传感器应能够准确反映手部弯曲角度的变化;检测手部力量恢复及纠正握姿的数据手套,所使用的传感器需具备对手指压力变化的快速响应性。弯曲传感器可用于检测手指弯曲角度的变化。由加速度计、陀螺仪和磁力计组成的惯性测量单元(IMU)可用于测量手指运动方向。两者结合可用于检测佩戴者手势的变化。压阻式、电容式和压电式传感器的电阻、电容、电压在受压过程中会发生变化,故基于这些传感器制作的数据手套可检测手指施加压力的变化,用于手部力量恢复的检测及手部握姿的调整(图1)。

为提升手套穿戴体验,可将柔性应变传感器接入手套。当柔性应变传感器弯曲或拉伸时,材料电阻值发生改变^[8]。常见的柔性应变传感器是通过在柔性薄塑料基板上涂覆电阻碳元件或使用配备接收器的光纤实现的。这种传感器具有使用周期长、制作成本低等优点,但也有局限性,如它们通常只能进行弯曲回复运动,柔性基板无法承受较大的拉伸作用;长时间弯曲没有保护涂层的柔性传感器易导致其永久弯曲,进而影响基极电阻。基于此,能承受

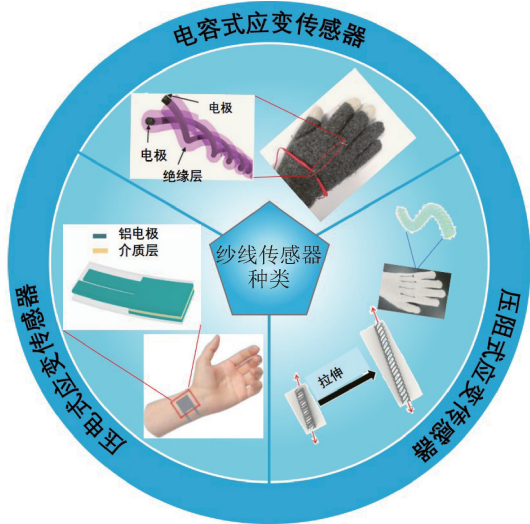
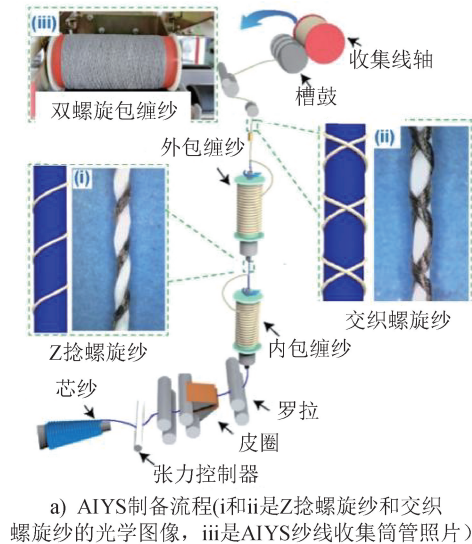


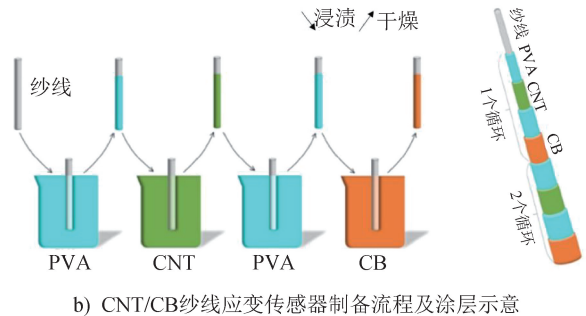
Fig. 1 Application of different yarn strain sensors

人体更大运动幅度,拉伸循环稳定性更好的拉伸应变传感器——纺织基柔性应变传感器应运而生,其能被拉伸并适应人体关节及其他可形变部位,已成为主流的选择,其中又以纱线应变传感器较为常见。例如,Wu 等^[9]将 2 根镀银导电聚酰胺(PA)纱线与聚氨酯纱线互锁,制作了具有负泊松比的全纤维拉胀-交织纱线传感器(AIYS)[图 2a]。Zhang 等^[10]通过在氨纶纱线上涂覆多层聚乙烯醇(PVA)、碳纳米管(CNT)和炭黑(CB),制得了 CNT/CB 纱线应变传感器[图 2b]。除了基于传统的包缠纱结构外,一些学者还在结构上做了新的尝试^[11]。例如,Han 等^[12]设计了一种柔性针织传感器[图 2c],其传感区域由尼龙/氨纶纱和镀银尼龙纱编织而成,非导电区域由尼龙/氨纶纱和弹性聚酯纱制成。Lee 等^[13]在聚氨酯纤维中加入金属银纳米颗粒,获得了可拉伸高导电纤维,再将 2 根这样的纤维形成中空双螺旋结构,得到了一种无线光纤纤维应变传感器[图 2d]。

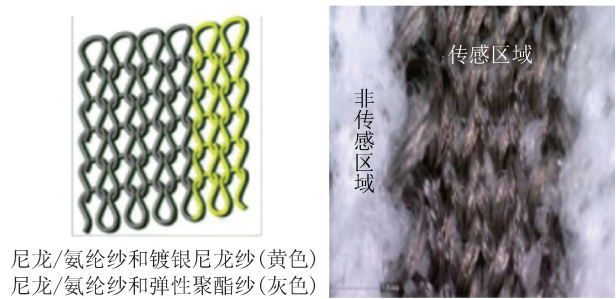
除压阻式、电容式和压电式传感器之外,离子聚合物金属复合材料(IPMC)柔性压力传感器因具有轻质柔软、易加工、弹性好、灵敏度高优点,常被用于数据手套中检测手部状况。Gudarzi 等^[14]采用直接组装工艺制备了 IPMC 传感器,其中间层为 Nafion117(全氟化膜),Nafion117 两侧表面涂覆有多层电极溶液以形成电极层,最后通过熔压将金属压在电极层表面以增强导电性。Lee 等^[15]采用银



a) AIYS制备流程(i和ii是Z捻螺旋纱和交织螺旋纱的光学图像, iii是AIYS纱线收集筒管照片)

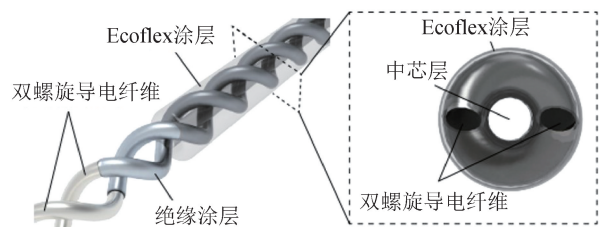


b) CNT/CB纱线应变传感器制备流程及涂层示意



尼龙/氨纶纱和镀银尼龙纱(黄色)
尼龙/氨纶纱和弹性聚酯纱(灰色)

c) 一种柔性针织传感器的构造及实物照片



d) 一种无线光纤纤维应变传感器

图 2 不同类型的纱线应变传感器

Fig. 2 Different types of yarn strain sensors

镜法将 Nafion 117 浸入 $[Ag(NH_3)_2]OH$ 溶液中,通过将表面的银络合物还原成金属银,赋予传感器优良的传感性能。

纺织基传感器通常具有形状适应性强、柔韧性好、可编织性佳等特点,它的出现解决了一般柔性传感器拉伸回复性差、与可穿戴设备集成困难等问题,但也存在一些局限性,如不能同时具备高灵敏度、高

拉伸性和高线性,此外机械滞后性、重复性和耐用性也是其大规模生产时不可忽视的问题。部分纺织基传感器特性对比见表 1。

表 1 部分纺织基传感器特性对比

Tab. 1 Characteristic comparison of some textile based sensors

传感器类型	优点	缺点	有效应变范围	可重复使用次数	响应时间/s	参考文献
AIYS	响应时间短、适形性良好	应变范围小,耐洗涤性较差	>120%	8 000	0.025	[9]
CNT/CB 纱线应变传感器	制作简单、应变响应性良好	应变层易断裂、脱落	>150%	1 300	—	[10]
柔性针织传感器	循环稳定性良好	灵敏度低、应变范围有限	>135%	—	—	[12]
无线光纤纤维应变传感器	灵敏度和传感应变范围可调	高灵敏应变范围小	>130%	2 000	—	[13]
具有裂缝状路径和蛇形曲折结构的应变传感器	循环稳定性高、耐受性强	应变范围小、制作工艺复杂	>110%	10 000	<0.058	[16]

1.2 传感阵列的集成

人体单只手掌由 27 块骨头组成,之间由关节系统连接。如图 3 所示,从手腕到指尖,关节命名依次为腕掌关节 (carpometacarpa joint, CMC)、掌指关节 (metacarpophalangeal joint, MCP)、指间关节 (interphalangeal joint, IP)。其中,IP 又可进一步分为远端指间关节 (distal interphalangeal joint, DIP) 和近端指间关节 (proximal interphalangeal joint, PIP)。每个关节拥有可用于旋转的 1 个或多个自由度 (DOF)。因此,用于手部姿态估计的自由度 (DOF) 大致有 27 个^[17]。

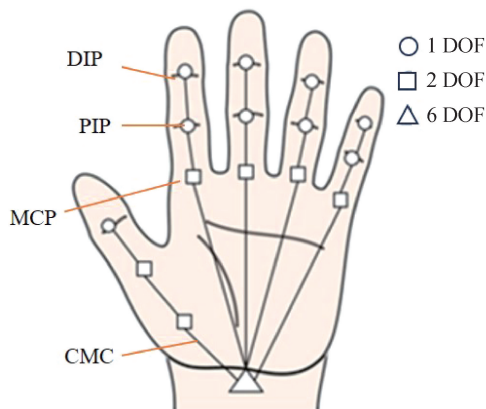
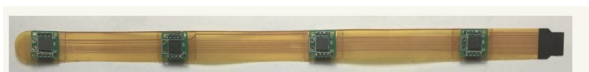


图 3 人体手掌关节自由度分布 (以左手为例)

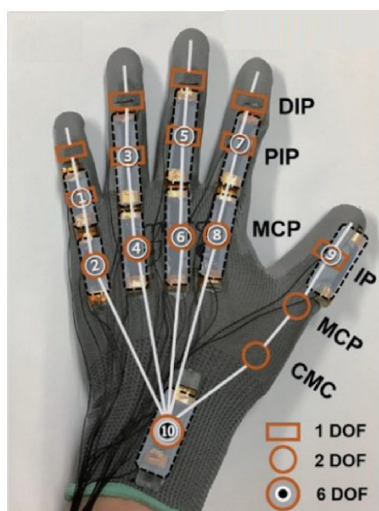
Fig. 3 Distribution of degrees of human palm joints (left hand)

传感电路的集成关系到信号采集和传递的稳定性。手套中传感系统的集成包括传感器与电路的互联,以及传感电路与手套的集成。对于非柔性传感器,通常采用焊接法,如 Lin 等^[18]先将惯性测量单元 (IMU) 焊接到印刷电路板上形成 IMU 传感器板 (IMU-SB),再将 IMU-SB 与柔性印刷电路板 (FPCB) 结合形成手指柔性复合板 (FFCB) [图 4a]。而对于柔性传感器,主要的方式是使用导电材料将传感器和导线连接形成传感电路,如 Lee 等^[19]将制备的炭黑混合 DragonSkin[®] 弹性体应变 (CB-DS) 传感器与导线用银浆连接形成传感电路,然后进行热处理使其硬化,最后安装到具有塑料框架的手套上 [图 4b]。Shen 等^[20]用镀银尼龙线将传感器与电路连接,并使用软带封装集成,得到了可拉伸弯曲传感器 [图 4c]。

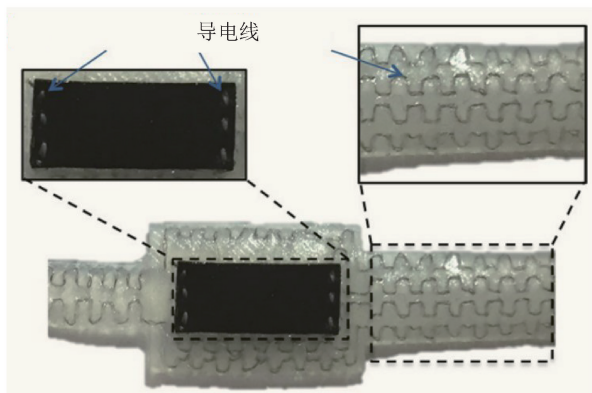
传感电路集成到手套中的方法包括贴装式和一体化集成式 2 种。对于柔性传感电路,主要采用贴装式集成。如 Zhou 等^[21]设计了一种基于摩擦起电效应的螺旋芯-鞘型结构可拉伸纱线传感器阵列 (YSSA),能缝制到手套中。该传感器的传感电路单元由导电纱线缠绕橡胶微纤维组成,传感电路主体为聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 套管所覆盖 [图 5a]。贴装式集成操作简单,能快速实现传感电路与手套的贴合,但随着手部运动和穿戴次数的增加,连接点



a) FFCB



b) CB-DS传感器在手套中的组装



c) 可拉伸弯曲传感器的连接方法

图 4 数据手套中传感器在电路中的互联方式

Fig. 4 Interconnection of sensors in the circuit in the data glove

处的耐用性会降低,整体稳定性下降,信号失真率显著增加。因此,为了将传感电路与手套更好地集成,同时使传感电路的排列更贴合手部运动,且不会随使用次数的增加而导致传感电路脱离手套,研究者们尝试了一体化集成方式。Huang 等^[22]使用机织皮肤电路(WovenProbe)制造工艺制作数据手套,在机织物基板上利用 20 多根导线连接 7 个小型印刷电路板(PCB)用于手势监测[图 5b)]。该工艺通过引入花边织造技术使 PCB 布局灵活,同时通过引入双面机织、双层织造技术^[23],对复杂电路进行布局。一体化机织技术在一定程度上解决了数据手套中传感电路集成的耐用性及佩戴舒适性,使数据手套的一体化织制成为可能。柔性传感阵列需克服诸

如串扰和电源管理之类的技术障碍。理想状况下,数据手套应具有低功耗,以及较少的布线,以便于穿脱,提高穿戴体验。基于 3D/4D 打印技术的快速发展^[24],可使用新型柔性材料 3D 打印制备传感器和电子器件^[25],实现柔性传感阵列的一体化集成,显著优化数据手套中的电线布置。但就目前的制造工艺而言,一体化集成数据手套在前期的电路排布设计和机织工艺操作上都较为繁琐,故较难实现产业化。

2 信号特征的提取

数据手套依靠手套中的传感器分析手部各种运动。其采集信号的方法一般是,贴附在手指处的传感元件单独检测每根手指的运动并将其转化为电信号,再由连接传感器的数据线将电信号传输到数据采集器并对信号进行采集和处理,最后信号通过蓝牙传输到终端(图 6)^[26]。

2.1 信号质量影响因素

传感系统的性能对数据手套信号采集的有效性和准确性有直接影响。传感系统设计时,传感器的结构、工艺参数,以及它们在手套中的数量和分布,都是需要考虑的因素。表 2 归纳了数据手套中传感器的典型数量分布及传感性能。

2.2 信号处理方法

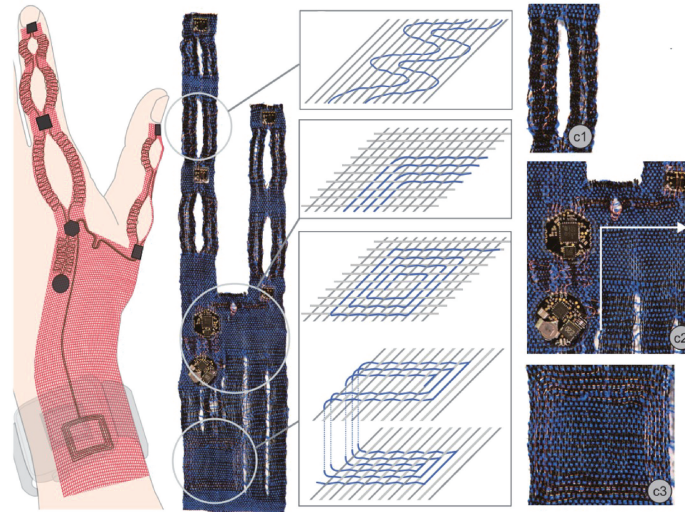
不同应用场景的数据手套,对采集的信号数据所使用的处理方式是不同的(图 7)。

一般来说,手势识别翻译用数据手套需采集和处理大量的手势信号,因此降维处理非常必要。手势识别中,主成分分析(PCA)法被广泛用于降维处理^[28],以提取每个手势的主要特征并去除冗余信息。另一种可视化数据集的降维技术 t-SNE 也常被用于建立数据集,所得数据集中的每个点表示从传感器数据投影的一个姿势信息。同一字母类别的数据点被聚类在一起,这就大致生成了 26 个类别。将数据手套采集生成的数据集导入不同的算法中进行手语分析识别。人工智能深度学习算法为实现高级数据分析提供了极大的可行性,其通过全面的特征提取进行精细分析和准确识别。

Wen 等^[29]基于非分割方法的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)模型对数据集中



a) YSSA及其在手套上的组装（贴装式集成）



b) WovenProbe制造工艺制作数据手套

图5 数据手套中传感阵列的集成

Fig. 5 Integration of sensing arrays in data gloves

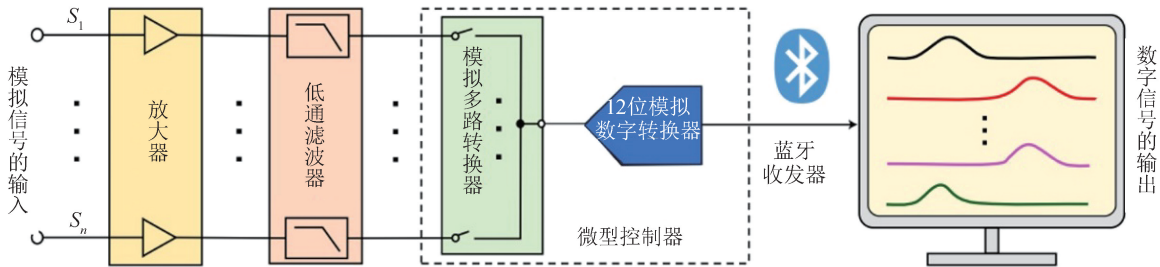


图6 常见的数据手套信号采集流程

Fig. 6 Common data gloves signal acquisition flow

的句子信号进行分类识别,再由分割法 CNN 模型对这些句子信号划分和标记,以识别一些未在数据集中出现的句子。这种基于 CNN 模型的信号处理方式^[30]能够分割、储存信号元素,再通过组建深度学习架构、单个分类器和层次分类器,反向推断、重建和识别完整的句子。Wu 等^[9]使用人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 架构的手语分类,将传感阵列的多路电阻信号经过归一化后输入深度学

习算法。利用神经网络算法对传感器进行标定,有效消除了反复弯曲导致的传感器基线偏移、应力松弛和位置移动等问题。

对于辅助控制用数据手套,可根据具体的辅助用途对传感器采集到的信号进行处理。例如, Rahman 等^[31]开发的用于辅助治疗中风患者手部运动的数据手套,其中右手为控制手,辅助左手恢复训练。右手手指的位置信息由弯曲传感器确定并发送

表 2 数据手套中传感器的数量分布及传感性能

Tab.2 Quantity distribution and sensing performance of sensors in the data glove

传感器类型	数量分布(单只手套)	传感性能	应用	参考文献
惯性测量单元	18 个,其中 1 个安装在 前臂	弯曲角度平均误差在 $\pm 3^\circ$,在 医生可接受范围内	评估受伤手部灵活 性的恢复状况	[18]
CB-DS 纱线应变传感器	10 个覆盖手指的 PIP 和 MCP,1 个覆盖手腕	手套能区分 3^{10} 种数据模式	手语翻译	[19]
聚酯层 Flexpoint 弯曲传 感器	10 个,分别位于 5 根手指 的 MCP 和 PIP 处	输出电压与手指弯曲角度之 间的线性度高达 0.970 2	监测、量化手部损伤	[20]
YSSA	5 个,覆盖每根手指的 PIP	11 个手势,识别准确率高达 98.63%,平均识别时间 <1 s	手语翻译	[21]
涂覆石墨烯的柔性弯曲 传感器	5 个,每个传感器覆盖每 根手指的 3 个关节	对于“1~10”的手势识别准确 率高达 95.7%	手语翻译	[27]

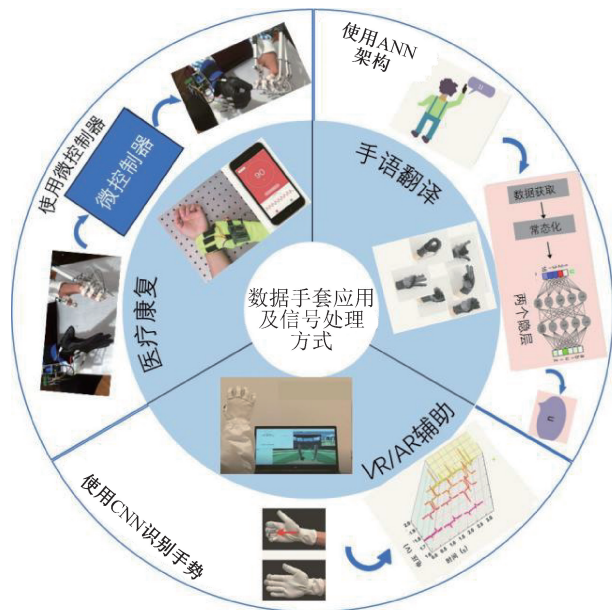


图 7 不同应用场景的数据手套的信号处理方法
Fig.7 Signal processing methods of data gloves for
different application scenarios

到微控制器单元,由微控制器单元计算线性制动器

冲程应当延伸或缩回距离,并通过无线电发射器将数据无线发送给放置在左手手套中的微控制器。左手微控制器根据接收到的数据控制线性执行器的移动,从而实现了辅助偏瘫手的运动。Song 等^[32]设计了能辅助纠正羽毛球握拍姿势的数据手套。Wen 等^[29]开发了用于 VR/AR 的辅助手套,其摩擦电信号由具有 8 个放大器集成电路的 Arduino MEGA 2560 收集。10 个传感器分别记录了与每个动作相关的 200 个数据点,以供训练模型识别。Python 通过串口控制实时处理采集的数据,再通过 CNN 识别手势,并通过 TCP/IP 通信向 Unity 给予相应的命令,完成人机交互过程。不同应用场景的数据手套信号采集处理方法及特点总结列于表 3。

3 结束语

数据手套的常用传感单元有弯曲传感器、加速度计、霍尔效应传感器、拉伸传感器及磁传感器等。

表 3 不同应用场景的数据手套信号采集处理方法及特点

Tab.3 Methods and characteristics of data gloves signal acquisition and processing for different application scenarios

数据手套	应用场景	信号处理方法	特点	参考文献
基于全纱线网络传感器的数据手套	手势翻译	基于 ANN 架构的手语分类	对字母表整体识别正确率达 99.8%,平均识别时间 <0.25 s	[9]
摩擦电超疏水织物手套	VR/AR 应用	CNN 信号识别	高精度手势识别和虚拟空间中的实时控制	[29]
摩擦电智能手套	手势翻译	基于分割法的 CNN	对数据集单元组成的新句子的识别正确率为 82.81%	[33]

每种传感器都有各自的特点和应用价值,其中柔性传感器,特别是纺织基传感器,具有很好的适形性和

贴合性,易与手套集成,能在运动时捕捉更细微的动作信号,提高信息传递的准确性。但纺织基传感器

长时间使用后易出现导电层脱落、应力松弛等现象。为解决这些问题,已有研究从纺织基传感器的结构设计出发,开发了包缠或涂覆导电材料的纱线传感器,以及针织传感器、中空双螺旋结构传感器等,传感器的循环稳定性和耐用性显著提高。

传感阵列和数据手套的集成一般采用贴装法。此法相对简单便捷,但在穿戴的舒适性和耐用性方面存在明显的设计缺陷。一体化集成法兼顾了电路布线的优化和手套的穿戴体验,但该方法前期设计较复杂,机织和针织工序较繁琐,目前较难实现量产。

不同应用场景,传感器的种类、数量及位置会有所不同。同时,随着计算机水平和人工智能算法的进步,数据手套处理采集信号的方法也有了更多的选择。例如,手势翻译识别常采用 CNN 模型、深度学习等构建识别数据集中从未出现的新单词和新句子;VR/AR 交互领域常先采用 CNN 识别信号,再向 Unity 给予相应命令进行互动。

目前,数据手套在一体化集成方面还存在一些挑战。未来,采用 3D/4D 打印技术制备传感器和电子器件是一种发展趋势,其能实现柔性传感阵列的一体化集成,并能优化数据手套中的电线布置。此外,数据手套作为一种可靠的人机交互媒介,不仅需要检测手势运动,还需要提供触觉反馈。随着仿生电子皮肤技术的进步,数据手套正朝着智能皮肤手套的方向发展,未来这种手套将能够精准感知触觉,适用于更精细的操作场景。

总之,数据手套发展潜力巨大。伴随着计算机科学、物联网技术、材料科学等的进步和创新,数据手套在捕捉信号、传递信息、分析数据等方面将显著提升,给用户带来前所未有的交互体验。但当前数据手套也需解决传感阵列和手套一体化集成的问题,以实现大规模生产,确保产品稳定性和耐用性。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] CHEN W Y, YU C C, TU C Y, et al. A survey on hand

pose estimation with wearable sensors and computer-vision-based methods[J]. *Sensors*, 2020, 20(4):1074.

[2] AHMED M A, ZAIDAN B B, ZAIDAN A A, et al. A review on systems-based sensory gloves for sign language recognition state of the art between 2007 and 2017[J]. *Sensors*, 2018, 18(7):2208.

[3] RASHID A, HASAN O. Wearable technologies for hand joints monitoring for rehabilitation: a survey [J]. *Microelectronics Journal*, 2019, 88:173-183.

[4] OZIOKO O, DAHIYA R. Smart tactile gloves for haptic interaction, communication, and rehabilitation [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(2):2100091.

[5] SUN Z D, ZHU M L, LEE C K. Progress in the triboelectric human-machine interfaces (HMI)-moving from smart gloves to AI/haptic enabled HMI in the 5G/IoT era [J]. *Nanoenergy Advances*, 2021, 1(1):81-121.

[6] ZHU M L, SUN Z D, ZHANG Z X, et al. Haptic-feedback smart glove as a creative human-machine interface (HMI) for virtual/augmented reality applications [J]. *Science Advances*, 2020, 6(19):eaaz8693.

[7] 庞潍, 刘通, 李娅萍, 等. 纺织结构传感器的研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2012, 30(6):1-7.

[8] 邢任权, 闫静, 杨光, 等. 纤维/纱线柔性电阻式应变传感器的研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2022, 40(1):1-7.

[9] WU R H, SEO S, MA L Y, et al. Full-fiber auxetic-interlaced yarn sensor for sign-language translation glove assisted by artificial neural network [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1):139.

[10] ZHANG R F, PAN P, DAI Q L, et al. Sensitive and wearable carbon nanotubes/carbon black strain sensors with wide linear ranges for human motion monitoring [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(7):5589-5596.

[11] 刘畅, 沈为, 徐天华, 等. 手部功能评估用针织添纱组织传感器的传感性能探讨[J]. *产业用纺织品*, 2020, 38(1):35-38.

[12] HAN X X, MIAO X H, LIU Q, et al. A Fabric-based integrated sensor glove system recognizing hand gesture [J]. *Autex Research Journal*, 2022, 22(4):458-465.

[13] LEE J, IHLE S J, PELLEGRINO G S, et al. Stretchable and suturable fibre sensors for wireless monitoring of connective tissue strain[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4:291-301.

- [14] GUDARZI M, SMOLINSKI P, WANG Q M. Bending mode ionic polymer-metal composite (IPMC) pressure sensors[J]. *Measurement*, 2017,103: 250-257.
- [15] LEE J H, CHEE P S, LIM E H, et al. Artificial intelligence-assisted throat sensor using ionic polymer-metal composite (IPMC) material[J]. *Polymers*, 2021, 13(18):3041.
- [16] WU X P, LUO X M, SONG Z M, et al. Ultra robust and sensitive flexible strain sensor for real-time and wearable sign language translation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023,33(36):2303504.
- [17] BARLIAN A A, PARK W T, MALLON J R Jr, et al. Review: semiconductor piezoresistance for microsystems [J]. *Proceedings of the IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2009,97(3):513-552.
- [18] LIN B S, LEE I J, YANG S Y, et al. Design of an inertial-sensor-based data glove for hand function evaluation[J]. *Sensors*, 2018,18(5):1545.
- [19] LEE S M, JO D, KIM K B, et al. Wearable sign language translation system using strain sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021,331:113010.
- [20] SHEN Z, YI J, LI X D, et al. A soft stretchable bending sensor and data glove applications [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. New York: IEEE Xplore, 2016: 88-93.
- [21] ZHOU Z H, CHEN K, LI X S, et al. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays[J]. *Nature Electronics*, 2020,3:571-578.
- [22] HUANG K, SUN R, ZHANG X. et al. WovenProbe: probing possibilities for weaving fully-integrated on-skin systems deployable in the field [C]//*Proceedings of the 2021 ACM Designing Interactive Systems Conference*. New York: Association for Computing Machinery, 2021, 1143-1158.
- [23] OU J F, ORAN D, HADDAD D D, et al. SensorKnit: architecting textile sensors with machine knitting[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2019,6(1):1-11.
- [24] OZIOKO O, NASSAR H, DAHIYA R. 3D printed interdigitated capacitor based tilt sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021,21(23):26252-26260.
- [25] OTA H, EMAMINEJAD S, GAO Y J, et al. Application of 3D printing for smart objects with embedded electronic sensors and systems [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2016,1(1):1600013.
- [26] WHEATLAND N, WANG Y Y, SONG H G, et al. State of the art in hand and finger modeling and animation [J]. *Computer Graphics Forum*, 2015,34(2):735-760.
- [27] GUO K, ZHANG S H, ZHAO S S, et al. Design and manufacture of data gloves for rehabilitation training and gesture recognition based on flexible sensors[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, 2021:6359403.
- [28] SHAHID N, PERRAUDIN N, KALOFOLIAS V, et al. Fast robust PCA on graphs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 10(4):740-756.
- [29] WEN F, SUN Z D, HE T, et al. Machine learning glove using self-powered conductive superhydrophobic triboelectric textile for gesture recognition in VR/AR applications[J]. *Advanced Science*, 2020,7(14):2000261.
- [30] 张勋, 陈亮, 朱雪婷, 等. 基于区域卷积神经网络 Faster R-CNN 的手势识别方法 [J]. *东华大学学报 (自然科学版)*, 2019,45(4): 559-563.
- [31] RAHMAN A, AL-JUMAILY A. Design and development of a bilateral therapeutic hand device for stroke rehabilitation [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013,10(12):405.
- [32] SONG X, PENG Y X, HU B C, et al. Characterization of the fine hand movement in badminton by a smart glove [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2020,48(4):443-458.
- [33] WEN F, ZHANG Z X, HE T, et al. AI enabled sign language recognition and VR space bidirectional communication using triboelectric smart glove [J]. *Nature Communications*, 2021,12(1):5378.

倡导绿色生活 共创美好未来