

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.04.001

## 基于可穿戴电子手套的手部运动虚拟现实系统

王大鹏<sup>1,2,3</sup>, 韩柄添<sup>1,2,3</sup>, 张晓航<sup>1,2,3</sup>, 刘腾<sup>1,2,3</sup>, 孟垂舟<sup>1,2,3</sup>, 郭士杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北工业大学 教育部智能康复装置与检测技术工程研究中心, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省机器人感知与人机融合重点实验室, 天津 300401; 3. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 为提升虚拟现实系统对于触觉感知的准确性和稳定性, 提出一种基于多传感器信息融合的手部触觉感知穿戴式电子手套和一个虚拟现实系统。在穿戴式电子手套每根手指的背部布置柔性弯曲传感器(Flex)采集手指弯曲度信息, 并在指尖布置力敏电阻器(FSR)实现触觉感知; 传感器通过阻抗分压电路与电路板形成电性连接, 经过模数转换(ADC)转换为数字信号; 收集的传感器信号经过数字低通滤波电路后, 通过串口通讯发送至开发的虚拟现实软件, 并通过识别不同手势及物体抓握实验来验证系统的可行性。结果表明: 该系统的触觉感知信号采集速率高达 50 Hz; 对于 26 个字母手势的模式识别准确率高达 85.31%; 物体抓握实验进一步验证了该系统对于手指捏持力度的精确反馈能力。

**关键词:** 多传感器信息融合; 可穿戴式电子手套; 虚拟现实; 数字低通滤波

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)04-0001-06

### Hand motion virtual reality system based on wearable electronic gloves

WANG Dapeng<sup>1,2,3</sup>, HAN Bingtian<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiaohang<sup>1,2,3</sup>, LIU Teng<sup>1,2,3</sup>, MENG Chuizhou<sup>1,2,3</sup>, GUO Shijie<sup>1,2,3</sup>

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for Intelligent Rehabilitation Device and Detection Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Hebei Key Laboratory of Smart Sensing and Human-Robot Interaction, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** To enhance the accuracy and stability of haptic perception in virtual reality (VR) systems, a wearable haptic-sensing electronic glove and a VR system based on multi-sensor data fusion are proposed. Flexible bending sensors (Flex) are mounted on the back of each finger of the electronic glove to collect finger-bending information, and force-sensitive resistors (FSR) are placed at the fingertips for haptic sensing. The sensors are connected to the circuit board via impedance-divider circuits and linked to an analog-to-digital converter (ADC) for signal digitization. Then, the digital signals from the sensors are filtered by a digital low-pass filter and transmitted to custom-developed VR software via serial communication. The system's viability is evaluated through various hand-gesture recognitions and object-grasping experiments. Results show that the system can sample haptic-perception signals at 50 Hz, recognize 26-letter hand gestures with 85.31% accuracy, and precisely feed back finger-gripping forces during object-grasping tests.

**Key words:** multi-sensor information fusion; wearable electronic gloves; virtual reality; digital low-pass filtering

随着虚拟现实(VR)技术的飞速发展,人们对于沉浸式体验的需求日益增长<sup>[1-3]</sup>。手部运动信息采集作为

VR系统中至关重要的一环,直接关系到用户体验的直观性和真实性。虚拟现实系统追求的是为用户提供

收稿日期: 2025-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3601400);河北省在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZBS2024042);河北工业大学学科交叉方向研究生培养资助项目(XKJC-2024008);中国科协青年人才托举工程博士生专项计划项目

第一作者: 王大鹏(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为生物机电一体化系统。E-mail: dpwang6@163.com

通信作者: 孟垂舟(1982—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能可穿戴设备。E-mail: 2018108@hebut.edu.cn

一种身临其境的体验,而手部运动信息采集是实现这一目标的关键技术之一<sup>[4-6]</sup>。Li 等<sup>[7]</sup>提出了一款名为 DI-Gesture 的系统,该系统采用毫米波雷达技术来实现手势识别功能,并设计了一种基于毫米波信号特性的数据增强框架,通过分析信号特征与手势变化之间的相关性,生成合成数据以丰富数据集的多样性。这种方法有效地提升了模型的泛化能力和识别效果。然而,环境因素的不稳定性可能会对该系统识别的准确性造成影响。

基于视觉的手势运动信息获取方法不断取得重大进展,可以实现较高精度的效果,但因为其对环境的要求较高以及隐私性问题,难以在大部分条件下部署<sup>[8-10]</sup>。Wang 等<sup>[11]</sup>提出了一种利用声学信号来感知空中手势的识别系统 SonicEst,该系统只需要智能手机的内置扬声器和麦克风,不需要任何额外的硬件,也不会泄露隐私,但是对环境要求较高。Wu 等<sup>[12]</sup>定义了一个基于数据手套的动态手势数据收集过程,提出了名为 Attention-based CNN-BiLSTM Network (A-CBLN) 的新模型,峰值达到 93.62%,但该模型复杂度较高,可能导致过拟合或训练时间较长,从而致使系统的鲁棒性不足。Korzeniewska 等<sup>[13]</sup>巧妙地采用导电性能优异的先进材料,自行设计并制作了一种可弯曲的传感器,其长度可根据不同患者的手指长度进行个性化调整。在对手势进行识别的测试中,该传感器表现出了 86.5% 的高识别率。然而,需要注意的是,由于这款传感器是定制化的,且其制作过程较为复杂,目前尚未实现商业化生产。Dibba 等<sup>[14]</sup>采用配备有惯性测量单元(IMU)传感器的可穿戴手表与戒指,进行手部动作的识别研究。该系统实现了 82.30% 的识别准确率。然而,该方法的不足之处在于,它要求用户将食指与中指相扣以固定 IMU 传感器,这一设计在一定程度上降低了其实用性。Jia 等<sup>[15]</sup>基于 Leap Motion 提出了一种实时检测手部动作的系统,静态手势的识别率达到 99.98%,动态手势的识别率达到 96.20%,但是对于长序列手部动作信息识别效率不高。

由此可见,研究者们已经基于各种传感手套对手势采集系统和策略进行了广泛且深入的探索。但是,当前研究仍存在问题,比如忽视了指尖的触觉感知、触觉传感单一以及缺少多传感信息融合等<sup>[16-19]</sup>。这些问题逐渐成为限制触觉感知系统准确性与稳定性的关键因素,并降低了系统在应对多变环境和繁杂手势时的适应性<sup>[20-21]</sup>。针对上述问题,本文提出一套基于多传感器的手部触觉感知信息采集及虚拟现实系统。该系统利用集成有 5 个柔性弯曲传感器(Flex)和 5 个力敏电阻器(FSR)的可穿戴式电子手套来捕获手指弯曲

与指尖触觉信息,并将这些数据传输至 Unity3D 软件,以实现人机交互。

## 1 系统开发

### 1.1 触觉感知信息采集硬件设计

本文设计了一款穿戴式电子手套,用于捕捉手势信息。该手套可以获得手背和手尖的运动信息,然后通过串口通讯将获得的信息传输到电脑端进行数据分析处理。图 1 为本文设计的可穿戴传感手套,由 5 个 Flex 传感器、5 个 FSR 传感器和 1 个嵌入式电子系统组成。通过导线将以上各个模块连接到手套上,实现手指运动信息及指尖触觉信息的采集。

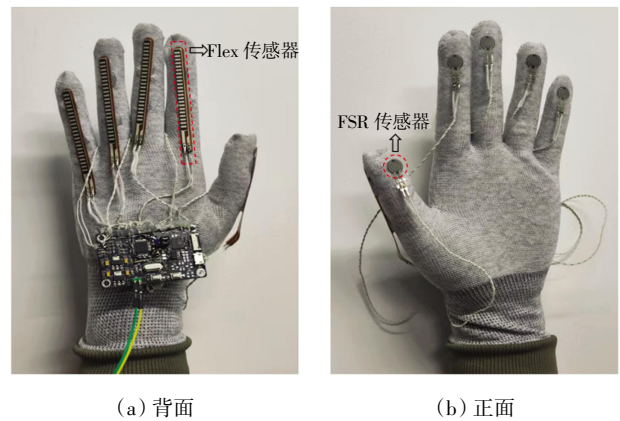


图 1 设计的穿戴式电子手套

Fig.1 Photos of designed wearable electronic gloves

信号接收流程如图 2 所示,首先将微控制单元芯片(MCU)进行初始化,5 个 Flex 传感器与 5 个 FSR 传感器通过外接电路进行信号采集,并通过 ADC 转换为数字信号,经过时钟电路计时 10 ms 之后,通过 UART 传输到 PC 端进行数据处理,最终在 Unity 上进行展示。

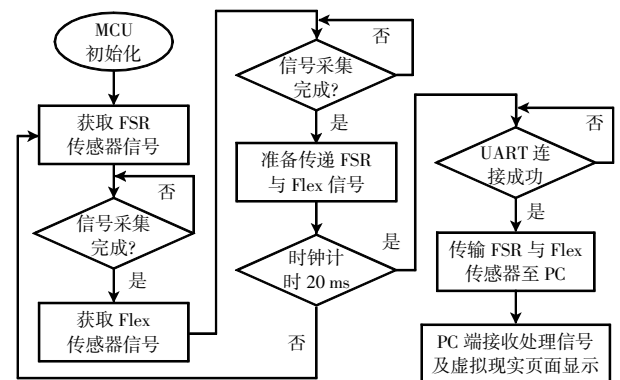


图 2 信号接收流程

Fig.2 Flowchart of signal reception

嵌入式电子系统如图 3 所示,包括 MCU 及其外围电路、电源模块、信号采集模块、蓝牙通讯模块。需

要注意的是,串口通信速率远高于蓝牙通讯方案,因此本研究中蓝牙通讯方案并未被直接采用。

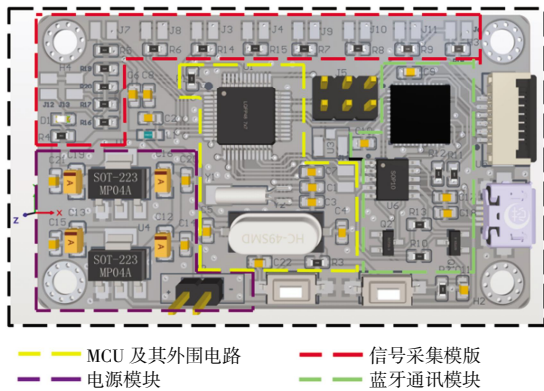


图 3 嵌入式电子系统  
Fig. 3 Embedded electronic system

信号采集模块采用的阻抗分压电路方案,实现对传感器数据的采集,其中 Flex 传感器和 FSR 传感器的分压电阻大小分别为 3 KΩ 和 5 KΩ。Flex 传感器的电阻变化反映出手指的弯曲程度,通过该传感器可以获得手部抓握时手势的运动信息。FSR 传感器的电阻值会随应力增大而减小,在进行抓握分析时能反映指尖的触觉信息。图 4 展示了 Flex 与 FSR 传感器在弯曲/应力下的性能测试结果。

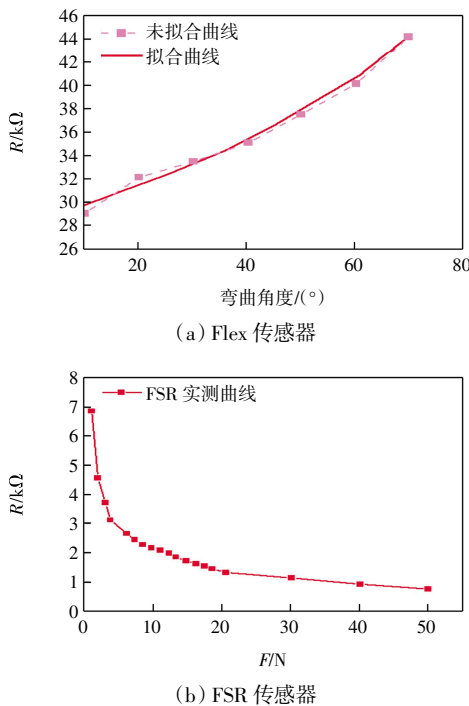


图 4 传感器在弯曲/应力下性能测试

Fig.4 Sensor performance test under bending/stress conditions

其中,图 4(a)表明手指弯曲角度与 Flex 传感器电阻之间具备明显线性关系;不同应力大小与 FSR 传感器的阻值具备唯一映射关系,且 20 N 应力以内传感器

的敏感度较高(图 4(b))。通过外接阻抗分压电路,并通过 ADC 将获取的模拟量信号转换为数字信号,再通过数字低通滤波实现稳定的传感器信号采集。

相应的硬件电路如图 5 所示。弯曲传感器通过以下方式连接到嵌入式电子系统的手部动作信号采集模块电子线路。柔性传感器信号由设计的阻抗分压器电路采集并通过模数转换(ADC)转换为数字信号。随后,MCU 通过串口通讯将信号传输到计算机。最终在 3D 软件 Unity 上显示,信号采集速率为 50 Hz。

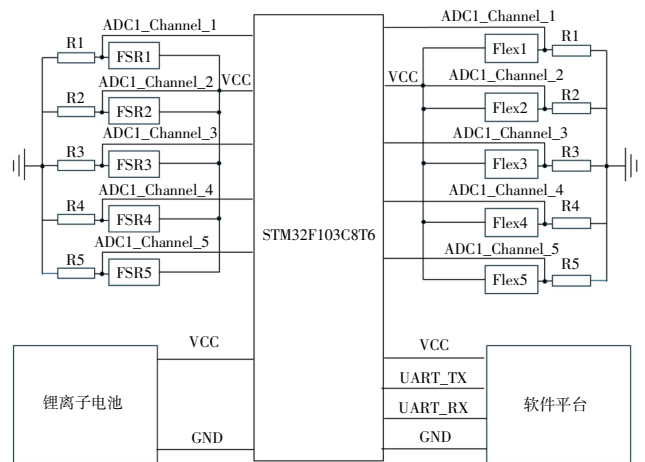


图 5 硬件电路

Fig.5 Diagram of hardware circuit

### 1.2 虚拟现实软件开发

借助 PyCharm 编辑器开发具有串口数据接收及处理的软件平台,其中虚拟现实部分借助 Unity 开发。通过在 PyCharm 编辑器中创建 Socket 服务器,实现将处理后的数据发送至 Unity,进一步实现虚拟现实交互。

该虚拟现实引擎通过接收串口数据,首先将数据归一化至 0~100。实际使用过程中,需要考虑由于传感器自身疲劳寿命限制和导电银浆氧化等因素导致的传感器性能衰退问题。因此,在进行归一化之前首先需要在软件中对传感器进行自校准。多传感器信息只包含 10 个维度(来自 5 个通道的 Flex 和 5 个通道的 FSR),不需要复杂的深度学习算法进行识别。本研究在软件中采用简单的模板匹配算法进行识别。模板匹配算法会通过多次实验结果为不同位置及类型传感器数据设置不同阈值函数,因此,该算法对模型没有一个训练过程,即没有训练模型参数的过程。在执行手语识别时,只需要将不同时刻的特征向量放入数据库中进行匹配,即可得到模式识别的结果。模板匹配算法数学逻辑及其在手语识别领域的典型应用被阐述在 Ahmed 等<sup>[22]</sup>的研究中。该算法类似 K-Means 聚类,运算简单、体积小,具备直接在 STM32 内部流畅运

行的潜力。

虚拟现实页面如图 6 所示。页面包括串口端口选择、手指弯曲映射和指尖触觉显示 3 部分。其中, Flex 传感器的数据被映射为手指弯曲, 随着人手指的弯曲, 虚拟现实页面中的对应手指也会进行弯曲。FSR 传感器感知指尖的应力变化, 无法被直观的体现在虚拟手上, 因此被设计在页面的右上角, 当对应指尖感知的压力数值越大, 红色颜色条越长。

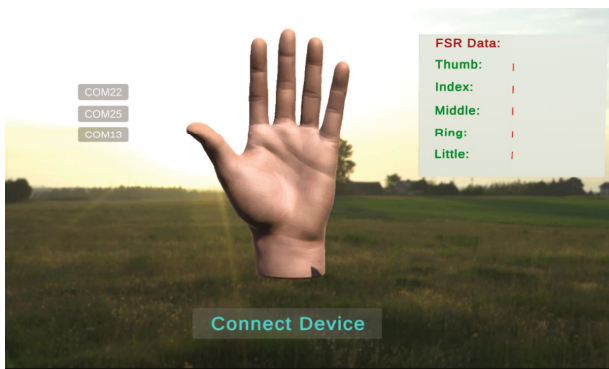


图 6 虚拟现实页面开发界面

Fig.6 Development of virtual reality interface

## 2 实验验证

本文通过让穿戴式电子手套执行不同手势及抓握不同物体等动作, 测试该系统对于手指弯曲和指尖触觉的感知性能。

### 2.1 执行不同手势

图 7 为执行不同手势时 Unity 平台的显示页面。



图 7 执行不同手势时的界面显示

Fig.7 Interface display when performing different gestures

由图 7 可以明显看出, 在操作者执行手势时, 手指的弯曲被实时映射到电脑软件中。需要注意的是,

在执行图 7(c)和图 7(d)的“数字手势 3”和“握拳”手势时, 手指的食指指尖和大拇指指尖是接触的, 因此页面右上角中大拇指和食指 FSR 传感器色条长度相较于其他手指更长。

类似地, 将手势数量提升到 26 个英文字母, 进一步执行不同手势下的准确率测试。对 10 位志愿者的每种手势采集 20 次, 每执行 1 次手势后要求受试者休息 10 s 再执行下一次手势。采用十折交叉验证, 图 8 展示了执行不同手势下的混淆矩阵。

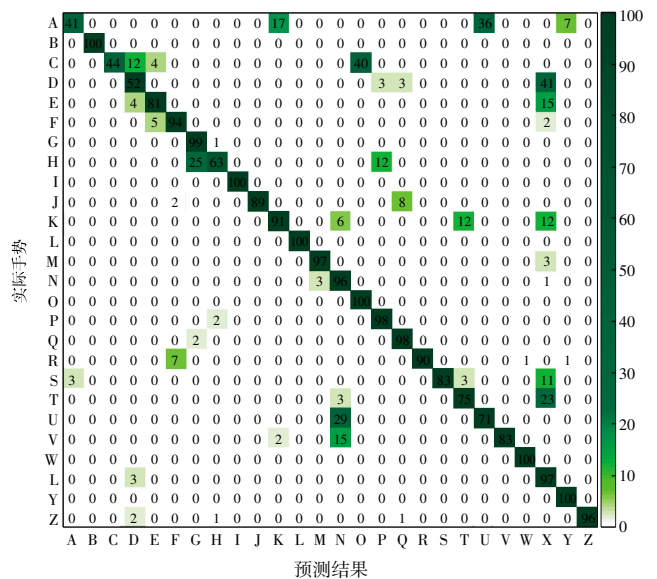


图 8 26 个字母手势下的模式识别混淆矩阵

Fig.8 Pattern recognition confusion matrix with 26 Alphabetic gestures

实验结果表明, 该系统在手势识别方面具备 85.31% 的模式识别准确率。需要注意的是, 手势 C 被预测为手势 O, 以及手势 D 被预测为手势 X 的概率均高于 40%。如图 9 所示, 这是由于在执行 2 个手势时, 仅手指关节角度存在细微差异造成的。

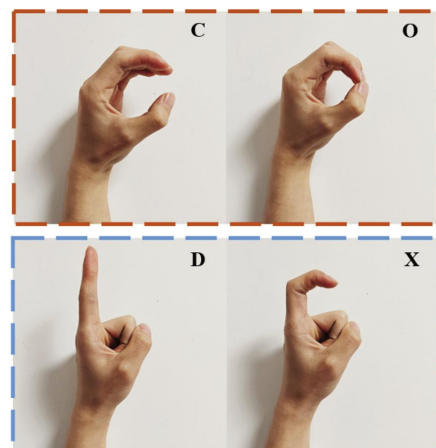


图 9 做出标准字母手势“C”“O”“D”和“X”的照片

Fig.9 Photos of standard letter gestures "C" "O" "D" and "X"

## 2.2 抓握不同物体

本研究通过多模态抓握实验对设备的触觉感知性能进行了验证。实验选取了具有典型几何特征的物体作为测试样本,结果如图 10 所示。



(a) 抓握水瓶



(b) 拿捏笔

图 10 抓握不同物体时的界面显示

Fig.10 Interface display when grasping different objects

由图 10(a)可知,对饮料瓶进行抓握时,所有手指处于弯曲状态,同时所有 FSR 传感器的色条均表现出显著拉伸,验证了设备对曲面接触力的有效感知;由图 10(b)可知,拿捏笔时,虽然其手势构型与“数字手势 3”具有相似性,但通过食指与拇指间 FSR 色条的显著伸长特征,证实了设备对捏持力度的精确反馈能力。

## 3 结束语

本研究提出一种基于 Flex 和 FSR 传感信息融合的手部触觉感知穿戴式电子手套,并通过开发的虚拟现实系统进行实时手部姿态映射。该柔性电子手套通过在手指背部布置 Flex 传感器和在指尖布置 FSR 传感器,实现手指弯曲度信息和触觉感知。传感器通过阻抗分压电路与电路板形成电性连接,经过 ADC 转换为数字信号。收集的传感器信号经过数字低通滤波电

路后,通过串口通讯发送至开发的虚拟现实软件。通过执行不同手势下模式识别精确度实验及异形物体抓握实验,对系统的感知性能进行了测试。结果表明:本文所开发的系统对于 26 个字母手势的识别率达到 85.31%,物体抓握实验进一步验证了该系统对于手指捏持力度的精确反馈能力。

## 参考文献:

- [1] GAO P. Key technologies of human-computer interaction for immersive somatosensory interactive games using VR technology[J]. *Soft Computing*, 2022, 26(20): 10947-10956.
- [2] ZHAO H J, CHENG M J, HUANG J Y, et al. A virtual surgical prototype system based on gesture recognition for virtual surgical training in maxillofacial surgery[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2023, 18(5): 909-919.
- [3] CHAKRABORTY B K, SARMA D, BHUYAN M K, et al. Review of constraints on vision-based gesture recognition for human-computer interaction[J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(1): 3-15.
- [4] 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.
- [5] ZHOU H, HUANG W, XIAO Z, et al. Deep-learning-assisted noncontact gesture-recognition system for touchless human-machine interfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(49): 2208271.
- [6] LI F, FEI J. Gesture recognition algorithm based on image information fusion in virtual reality[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2019, 23(3): 487-497.
- [7] LI Y D, ZHANG D H, CHEN J B, et al. Towards domain-independent and real-time gesture recognition using mmWave signal[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(12): 7355-7369.
- [8] AL FARID F, HASHIM N, ABDULLAH J, et al. A structured and methodological review on vision-based hand gesture recognition system[J]. *Journal of Imaging*, 2022, 8(6): 153.
- [9] CHAKRABORTY B K, SARMA D, BHUYAN M K, et al. Review of constraints on vision-based gesture recognition for human-computer interaction[J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(1): 3-15.
- [10] MOHAMED N, MUSTAFA M B, JOMHARI N. A review of the hand gesture recognition system: Current progress and future directions[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 157422-157436.
- [11] WANG X B, ZHANG J B, YANG M X. SonicGest: Ultrasonic gesture recognition system combined with GAN on smart-

- phones[J]. *Journal of Sensors*, 2023, 2023(1): 6813911.
- [12] WU J W, REN P, SONG B M, et al. Data glove-based gesture recognition using CNN-BiLSTM model with attention mechanism[J]. *PLoS One*, 2023, 18(11): e0294174.
- [13] KORZENIEWSKA E, KANIA M, ZAWIŚ LAK R. Textronic glove translating Polish sign language[J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6788.
- [14] DIBBA M, MIN C H. American sign language recognition system using wearable sensors and machine learning[C]//2023 21st IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS). Edinburgh, United Kingdom; IEEE, 2023: 1-5.
- [15] JIA J, TU G, DENG X, et al. Real-time hand gestures system based on leap motion[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2019, 31(10): e4898.
- [16] MITTAL A, KUMAR P, ROY P P, et al. A modified LSTM model for continuous sign language recognition using leap motion[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(16): 7056-7063.
- [17] PAN M Z, TANG Y Z, LI H Q. State-of-the-art in data gloves: A review of hardware, algorithms, and applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 4002515.
- [18] JI B W, WANG X Q, LIANG Z K, et al. Flexible strain sensor-based data glove for gesture interaction in the metaverse: A review[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2024, 40(21): 6793-6812.
- [19] WANG D P, WANG M Y, ZHANG Z Q, et al. Wearable electronic glove and multilayer Para-LSTM-CNN-based method for sign language recognition[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(24): 40787-40799.
- [20] TAN P C, HAN X, ZOU Y, et al. Self-powered gesture recognition wristband enabled by machine learning for full keyboard and multicommand input[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(21): e2200793.
- [21] PAN T Y, TSAI W L, CHANG C Y, et al. A hierarchical hand gesture recognition framework for sports referee training-based EMG and accelerometer sensors[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(5): 3172-3183.
- [22] AHMED M A, ZAIDAN B B, ZAIDAN A A, et al. Real-time sign language framework based on wearable device: Analysis of MSL, DataGlove, and gesture recognition[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(16): 11101-11122.

#### 本文引文格式:

王大鹏, 韩柄添, 张晓航, 等. 基于可穿戴电子手套的手部运动虚拟现实系统[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(4): 1-6.

WANG D P, HAN B T, ZHANG X H, et al. Hand motion virtual reality system based on wearable electronic gloves[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(4): 1-6(in Chinese).