

# 基于柔性光波导的感知袖套设计与研究

李梓楠, 贾丹平\*

沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月12日; 发布日期: 2026年5月20日

## 摘要

针对传统刚性传感器在上肢运动感知中信号失真与机械不匹配的瓶颈, 本文设计并制作了两种分别以 Dragon Skin 20 和弹性软管为外壳、Clear Flex 30 为核芯的柔性光波导传感器, 利用形变引起的光能量损失实现灵敏传感。在此基础上, 将两种传感器集成于感知袖套, 构建包含前臂  $4 \times 4$  交叉阵列与肘部条形传感器的分布式传感架构, 并设计了光电转换与数据采集模块。通过采集 16 种姿态下 11 个通道的传感器信号, 结合支持向量机(SVM)与随机森林算法进行训练与实时识别, 两类模型均表现出较高的识别精度与良好的泛化能力。该系统在运动康复与人机交互等领域具有重要应用潜力。

## 关键词

柔性光波导, 感知袖套, 姿态识别

# Design and Research on Sensing Sleeve Based on Flexible Optical Waveguide

Zinan Li, Danping Jia\*

School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning

Received: April 19, 2026; accepted: May 12, 2026; published: May 20, 2026

## Abstract

To address the limitations of traditional rigid sensors—namely signal distortion and mechanical mismatch—in upper limb motion sensing, this paper designs and fabricates two types of flexible optical waveguide sensors. These sensors feature Dragon Skin 20 and elastic tubing as outer casings, respectively, with Clear Flex 30 as the core, and utilize light energy loss caused by deformation to achieve sensitive sensing. Building on this, the two sensors were integrated into a sensing sleeve to construct a distributed sensing architecture comprising a  $4 \times 4$  cross-array on the forearm and a

\*通讯作者。

**strip-shaped sensor at the elbow, along with a photoelectric conversion and data acquisition module. By collecting sensor signals from 11 channels across 16 postures and training and performing real-time recognition using Support Vector Machines (SVM) and Random Forest algorithms, both models demonstrated high recognition accuracy and good generalization capabilities. This system holds significant application potential in fields such as sports rehabilitation and human-computer interaction.**

## Keywords

Flexible Optical Waveguide, Sensing Sleeve, Posture Recognition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

具身智能正走向规模化应用, 人形机器人有望成为新一代超级终端, 其核心是感知系统连接大脑与身体。可穿戴传感器作为人机交互的关键纽带, 市场爆发式增长, 受健康监测、健身跟踪和医疗应用驱动, 预计 2035 年规模达 390 亿美元[1]。上肢运动复杂多样, 涉及肩、肘、腕等多个关节的协调动作, 对感知系统的精度、动态响应、舒适性等指标提出了极高要求。针对上肢运动感知, 袖套式设计凭借分布式感知与舒适性, 在运动康复、职业健康监测等领域具有独特优势。

目前, 基于不同原理的上肢运动感知系统已得到广泛研究, 主要包括惯性测量单元(IMU) [2]、表面肌电信号(sEMG) [3]以及柔性力传感器等方向。

IMU 通过集成加速度计、陀螺仪和磁力计来测量肢体的姿态、角速度和加速度。基于 IMU 的系统精度高、响应快, 是捕捉全身大尺度运动的主流方案。然而 IMU 存在累积漂移误差, 易受磁场干扰, 且通常以刚性节点形式佩戴, 在长时间穿戴或涉及皮肤大变形时舒适性较差。此外, 其功耗相对较高, 多节点系统的成本和体积也随之增加。

sEMG 通过电极采集肌肉收缩时产生的电生理信号, 可用于识别手势和估计肌肉力。该技术能直接感知用户的运动意图, 在人机交互和假肢控制中应用广泛。但其信号极其微弱, 易受皮肤阻抗、汗液、电极移位等因素影响, 信噪比低, 且对个体差异和环境敏感, 需要复杂的信号处理与校准, 长期佩戴稳定性面临挑战。

传统刚性传感器因信号失真与机械不匹配难以适应上肢多种变形[4], 柔性传感器成为突破方向。其中, 压阻式与电容式柔性传感器[5]通过感知压力或形变导致的电阻或电容变化来工作, 材料多样、易于集成, 能够直接贴附于皮肤或衣物。其中, 压阻式传感器灵敏度高, 但存在明显的迟滞性和非线性; 电容式传感器动态响应好, 但对电磁干扰和温湿度变化敏感, 且结构复杂。两者普遍面临信号漂移和多路复用时的串扰问题, 在动态、复杂场景下的可靠性有待提升。

柔性光波导传感器将受力转化为光信号, 兼具可拉伸性、本质抗电磁干扰与传感驱动一体化集成[6]-[9]。例如, 微纳光纤指纹传感器实现高灵敏压力与滑移检测[8], 软体康复手集成的波导结构提升闭环控制精度[9], 添加石墨的 PDMS 光波导使灵敏度提高 3.9 倍[10]。这些进展表明, 柔性光波导技术正成为构建下一代高保真可穿戴感知的重要方向。

本研究针对传统可穿戴传感器在实际应用中所面临的诸多技术瓶颈, 提出了一种创新性的解决方案:

设计并制作了两种具有不同特性的柔性光波导传感器, 并将这些传感器集成到设计的感知袖套内, 结合合适的机器学习分类识别算法, 能够精准捕捉上肢姿态等信息。

## 2. 柔性光波导传感器的设计

柔性光波导传感器的结构和感知原理与传统的光纤传感器类似, 区别主要在于因制作材料的不同而导致硬度的差别较大。柔性光波导传感器由拉伸性能很好的柔性材料制作, 相比于传统的光纤传感器而言不仅容易产生弯曲变形, 还可以被拉伸和按压。柔性光波导传感器主要由发光器件、光敏器件以及光波导组成, 其中光波导由不透明的外壳和透明的核芯组成, 结构如图 1 所示。光线只能沿着光波导的方向传播, 而垂直于光波导的光会被限制, 且只有当光波导里面的入射光线满足一定的条件时才能被光敏器件检测到, 否则就会产生能量损失。

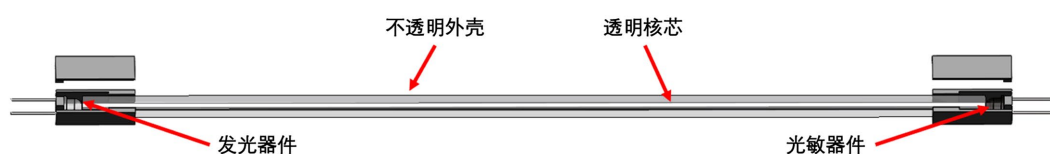


Figure 1. The structure of flexible optical waveguide sensor

图 1. 柔性光波导传感器的结构

本文设计了两种柔性光波导, 基于光波导外壳材质与内芯剖面形状的不同, 分为使用 Dragon Skin 20 硅胶浇筑外壳的矩形光波导, 以及使用弹性软管外壳的圆形光波导。二者均使用 Clear Flex 30 透明聚氨酯作为透明核芯。由于两种外壳材料的粗糙程度存在较大差异, 两种光波导传感器的感知性能有所不同。为了便于制作不同长度的柔性光波导传感器, 我们先制作光波导(包括不透明外壳和透明核芯), 将做好的光波导裁剪至合适的长度后, 再在两端安装光源和相应的信号接收装置。

### 2.1. 矩形光波导的设计与制作

矩形光波导的外壳采用 Dragon Skin 20 硅橡胶(硬度 20A)制作, 主要有以下优点: 传感器的硅胶外壳能与透明内芯充分贴合, 在浇筑硅胶时, 模具表面较为粗糙的纹理会被带到硅胶表面, 进而影响透明内芯与硅胶之间的界面的粗糙程度; 较为粗糙的界面能够让光波导在受到弯曲、挤压或拉伸等形变时, 产生较大的能量损失, 从而能够更加灵敏地感知受力的变化。此外, 较软的外壳使得光波导在受到压力时更容易发生形变。

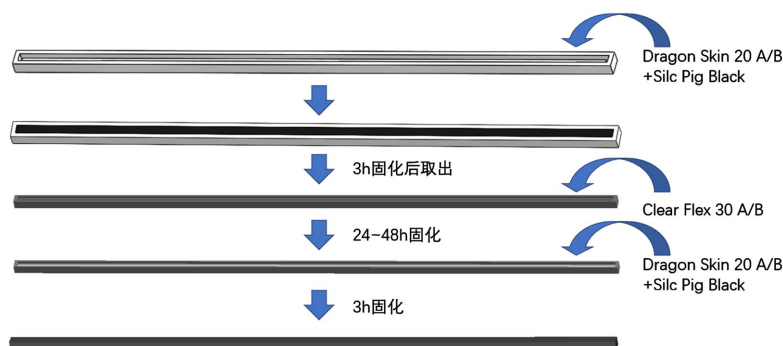


Figure 2. Fabrication process of rectangular optical waveguide

图 2. 矩形光波导的制作流程

矩形光波导的制作流程如图 2 所示。制作矩形光波导时, 首先将 Dragon Skin 20 A/B 溶液以 1:1 的体积比混合, 并加入少量黑色 Silc Pig 染色剂, 充分搅拌后注入模具中, 等待固化后取出。然后, 将配置好的 Clear Flex 30 混合液注入上述取出后的硅胶外壳中, 并等待其完全固化, 作为光波导的内芯。接着, 再覆盖一层与上述相同的黑色 Dragon Skin 20 混合液并待其固化。光波导的主体部分制作完成后, 剪去两端不透明的部分, 露出透光内芯。

## 2.2. 圆形光波导的设计与制作

圆形光波导的外壳使用黑色软硅胶管(内径 1.5 mm、外径 2.5 mm, 硬度 60 A)制作, 这种软硅胶管具有一定的弹性, 且表面较为光滑, 在受到较轻微弯曲时的能量损失较小, 这种特性使得在被缠绕到手臂等物体上时, 若不受到挤压等外力作用, 仍能有较强的信号。

将 Clear Flex 30 A/B (硬度 30 A)溶液按质量比 100:94 (体积比 1:1)混合并充分搅拌均匀, 通过注胶机注入黑色弹性硅胶管中, 等待完全固化(1 到 2 天)。由于 Clear Flex 30 在固化时会有较为明显的收缩, 因此待完全固化后裁剪硅胶管, 直至露出浇注的内芯。裁剪后检查光波导的透光性能, 避免光波导内芯中由于操作方法不当而出现的气泡影响后续的使用。

## 2.3. 传感器光电模块的设计

为了降低外界可见光对柔性光波导传感器传感性能的影响, 本文选用波长为 940 纳米的红外发光二极管和相应的红外光电二极管作为柔性光波导传感器的光源和信号接收装置, 所使用的二极管的直径约为 4 毫米。使用 3D 打印的模具将红外发光二极管以及光电二极管与光波导封装在一起, 并使用胶水固定光波导与二极管, 避免二极管与光波导之间发生位移, 并让二极管与光波导内芯充分接触, 导致传感器的性能发生改变。封装完成后, 在元件腿上焊接导线, 并剪去过长的元件腿。组装方式如图 3 所示。

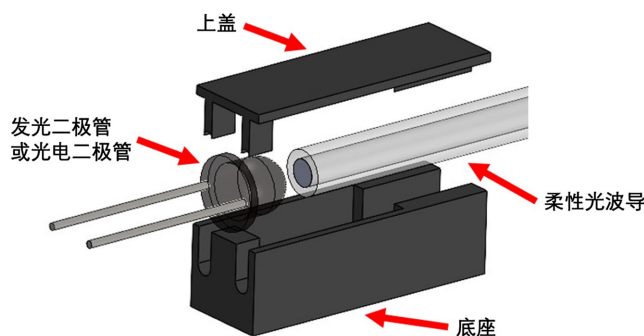


Figure 3. Optoelectronic modules of flexible optical waveguide sensor  
图 3. 柔性光波导传感器光电模块

## 2.4. 传感器的弯曲性能测试

当柔性光波导传感器受到弯曲等外部机械变形的作用时, 其内部传输的光线会因此发生路径偏移, 从原本的光波导结构中泄露出来, 这些泄露出的光线随即被具有较高吸收系数的外壳材料所吸收, 进而导致光信号的能量产生显著损失。通过测量传感器输出的电压值与弯曲的曲率之间的关系, 我们可以对不同的传感器的性能进行评估。

将柔性光波导传感器与几种具有不同曲率的测试模具相贴合, 使光波导的外表面与模具的表面自然贴合但不施加过大的力, 读取此时输出的电压值。

本文所制作的圆形光波导使用硅胶细软管作为外壳, 外壳各个方向的内表面可视为粗糙度相同。本文所制作的矩形光波导的底部外壳与顶部外壳使用 Dragon Skin 20 硅橡胶进行浇筑, 中间填充透明光导材料, 对于不同方向的外壳内表面, 粗糙程度存在一定差异: 在制作时朝上的表面, 由于未与第一步制作的底层外壳的内表面贴合, 导致该表面相较于其他方向粗糙度更低; 其他三个面的粗糙程度比较接近。实验中, 将矩形光波导的顶面与测试模具贴合, 底面朝外。

从测试数据(图 4)可以看出, 圆形光波导在曲率较小时, 其信号变化幅度也较小; 当曲率增加到一定值时, 能量损失迅速增大。相对而言, 矩形光波导对弯曲形变更加敏感。在同样的曲率下, 矩形光波导的信号变化幅度较大, 同时能量损失大幅增加所需的曲率相较于圆形光波导也更低。

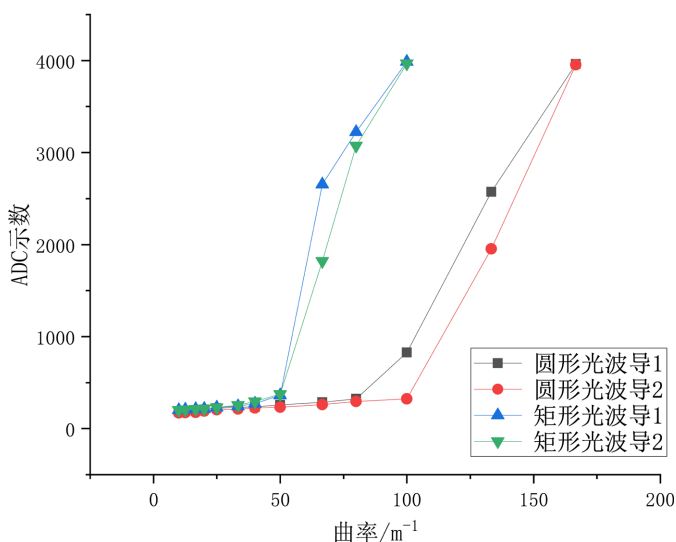


Figure 4. Bending response of flexible optical waveguide sensors

图 4. 柔性光波导传感器的弯曲响应

### 3. 基于柔性光波导的感知袖套设计

为了实现手臂部分的穿戴式感知, 实时感知手臂的动作, 本文设计了一种基于柔性光波导传感器阵列的感知袖套。人手臂的动作模式多种多样, 单独的柔性光波导传感器无法满足精确感知动作的要求, 因此将多种具有不同感知特性的柔性光波导传感器集成在袖套内部, 实现不同的功能。

#### 3.1. 感知袖套的结构设计

感知袖套由前臂、肘部、上臂三部分组成, 具体结构图如图 5 所示。其中, 前臂部分内置交叉排列的柔性光波导传感器, 能够较为精确地感知受力的位置和力度的大小; 肘部包含条形传感器, 能够实时检测手臂弯曲的角度; 上臂部分主要用于固定袖套。

袖套的前臂部分为扇环形设计, 内置 8 条柔性光波导传感器, 采用  $4 \times 4$  的纵横交叉的方式排列, 其中横向 4 条为圆形光波导, 纵向 4 条为矩形光波导, 通过柔性电路板(原理图如图 6 左侧所示)与采集板通过连接器对接。这种排列方式可以更加精确地定位到受力的点位。两种传感器需要分别置于不同的层, 以避免交叉点处存在互相挤压的情况。袖套佩戴时, 横向的传感器将会缠绕成圆弧, 而纵向的传感器几乎不发生形变, 而圆形光波导能够降低缠绕对信号带来的影响, 同时矩形光波导可以保证传感的高灵敏度。

肘部连接处安装了 3 条基于圆形光波导的柔性光波导传感器, 袖套佩戴时能够通过传感器信号的变

化实时感知肘部弯曲的各个方向的角度。与单根传感器相比, 多个传感器不仅能检测肘关节的弯曲, 还包括不同方向的扭转等动作。此外, 各个部分的传感器可以同时作用, 进行更加准确的动作感知。这些传感器通过另外的柔性电路板(原理图如图 6 右侧所示)与前面的主电路板(连接前臂 8 光波导)通过连接器对接, 再与前臂的信号一起输入采集板。

袖套的外层使用织物将内部的柔性光波导传感器及其电路包覆起来, 既能提高美观性, 又使袖套尽可能轻量化; 在袖套内部的传感器之间以及周围覆盖有海绵, 在保护元件的同时, 进一步提升舒适性。

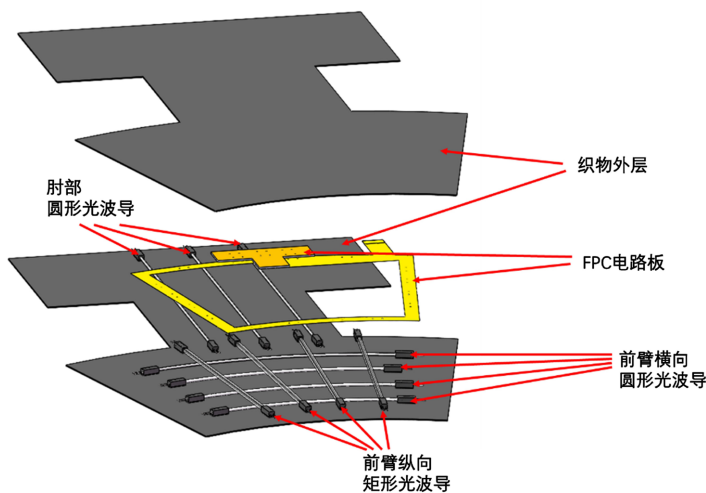


Figure 5. Structural diagram of sensing sleeve  
图 5. 感知袖套的结构示意图

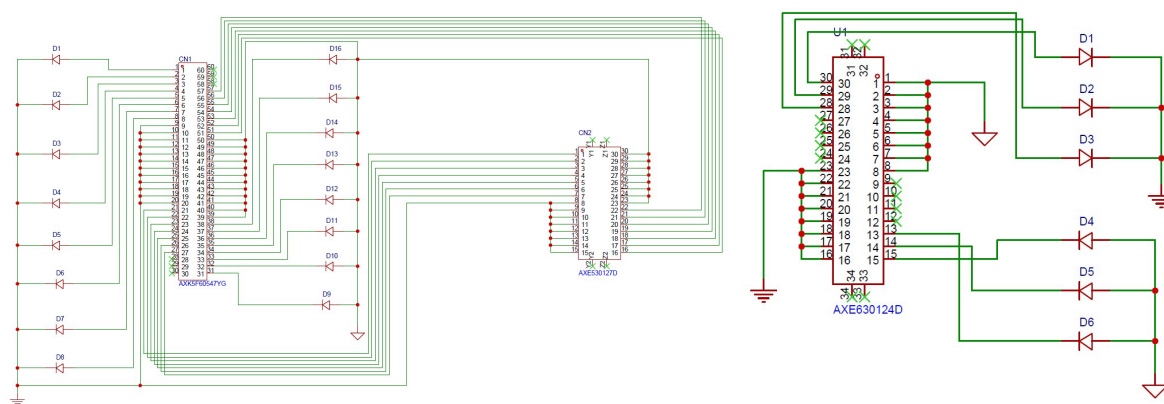


Figure 6. Schematic diagram of FPC inside the sensing sleeve  
图 6. 感知袖套内部柔性电路板原理图

### 3.2. 感知袖套的制作

感知袖套从外层(制作最下层)开始向内层搭建。首先裁剪三片布料: 扇环形(宽 20 cm, 圆心角 39°, 内圆弧半径 32 cm, 用于前臂)、正方形(边长 15 cm, 用于肘部)、矩形(36 cm × 12 cm, 用于上臂), 缝制成形。

首先在前臂区域布置柔性光波导传感器。先沿圆弧方向粘贴 4 条长度依次为 17、19、21、23 cm 的圆形光波导作为横向传感器; 再粘贴 4 条长 20 cm 的方形光波导作为纵向传感器, 纵向传感器下方垫高

3 mm 以避免挤压。网格内粘贴 2 mm 厚硅胶片, 用于传导外力并保持表面平整。传感器连接线焊至柔性电路板, 其余区域用海绵填充。在肘部至上臂区域, 先贴海绵, 再沿上下方向平行固定 3 条长 20 cm 的圆形光波导传感器, 并焊接到线路板, 空隙用海绵填充。为保护电路板, 在其上下均粘贴海绵夹层, 并对传感器二极管部分进行保护处理。最后覆盖与第一步相同的布料作为内层外壳, 先用胶带粘贴到海绵上, 再与外层布料缝合。袖套表面固定魔术贴, 便于穿脱且固定牢固。

制作完成的袖套的展开与佩戴时的外观如图 7 所示。



Figure 7. Appearance of sensing sleeve  
图 7. 感知袖套的外观

### 3.3. 感知袖套数据采集模块的设计

柔性光波导传感器通过光信号的变化检测力和形变, 需要将光信号转换为电压信号, 才能便于后续的处理。对于每个柔性光波导传感器, 红外发光二极管部分串联了一个  $430\ \Omega$  的电阻用于限流, 光电二极管部分接入 3.3 V 的反向偏置电压并串联一个  $620\ \text{k}\Omega$  电阻, 使输出电压在采集模块的模拟输入电压范围内。

数据采集模块选用 Seeed Studio 公司推出的 Seeduino XIAO SAMD21 开发板。该开发板在硬件设计上兼容 Arduino 开发框架, 具备良好的开发生态与代码复用性, 其紧凑的尺寸便于系统集成, 适合部署在空间受限的应用场景中。核心处理器采用 ARM Cortex-M0 架构, 集成 256 KB Flash 存储空间与 32 KB SRAM, 能够高效完成数据采集与信号预处理任务。模块引出 11 个 GPIO 引脚, 每个引脚均可独立配置为数字或模拟输入模式, 并支持 12 位分辨率的模数转换(ADC)。在本设计中, 所有 11 个 GPIO 引脚均被配置为模拟输入通道, 用于同步采集来自柔性光波导传感器的多路模拟信号。

为了将感知袖套与数据采集模块相连接, 设计了如图 8 所示的采集电路板。在采集板上的插槽中插入开发板, 通过连接器连接袖套的柔性电路板; 开发板通过 USB 连接到计算机, 每个 GPIO 引脚均独立接入上述的光电转换电路。

## 4. 人体姿态的分类识别

感知袖套内置多种柔性光波导传感器, 佩戴舒适、轻便, 可以对上肢的姿态及运动方式进行检测。在本实验中, 受试者佩戴袖套, 并做出指定的动作, 将此时袖套内所有柔性光波导传感器的数据记录下来, 并送入模型进行训练。训练的模型可以用于人体姿态的检测, 如检测坐姿、站姿是否端正, 进而在一定程度上实现动作意图的识别。

### 4.1. 人体姿态数据采集

采集前, 将感知袖套正确佩戴于受试者右臂, 确保其贴合紧密、位置准确, 以避免因滑动或偏移影

响数据采集的稳定性与一致性。随后, 受试者需依照图 9 所示, 依次完成 16 种预设的动作姿态的采集, 这些姿态分为站姿、坐姿两类, 涵盖了多种典型动作类型, 以全面覆盖日常活动中常见的运动模式。

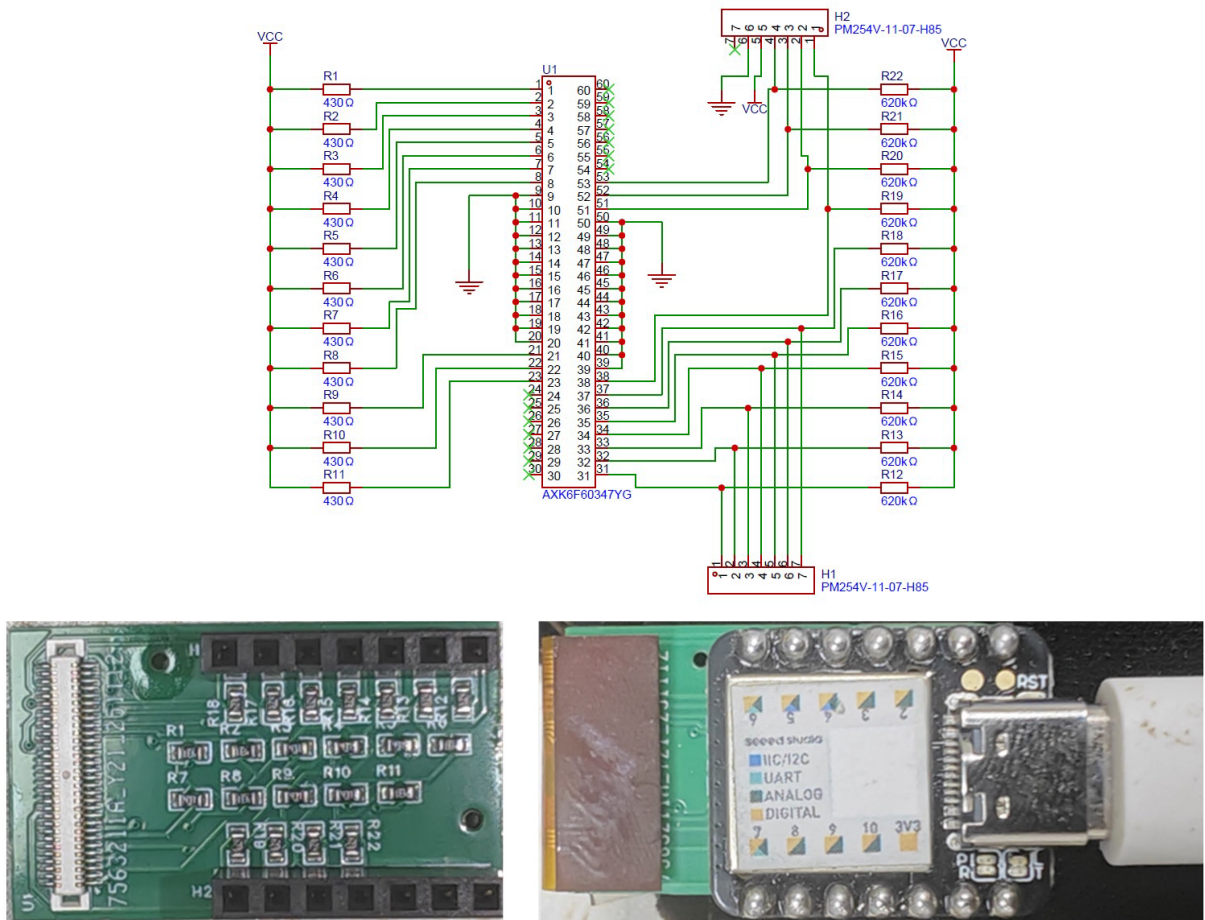


Figure 8. Data collector module for sensing sleeve  
图 8. 感知袖套数据采集模块



Figure 9. 16 postures for classification  
图 9. 16 种用于分类的姿态

采集过程中, 为抑制电路本身的噪声干扰, 首先在采集模块的 MCU 内部采用递推平均滤波算法进行平滑滤波处理, 随后将采集到的原始连续信号通过串口传输至计算机。借助采集程序, 可控制数据采集的开始与停止, 并将数据保存为 CSV 文件。当点击程序中的“开始采集”按钮时, 系统同步采集 11 个通道的柔性光波导传感器输出的连续信号, 其中包括分布于前臂区域的 8 条传感器和位于肘关节的 3 条传感器。每次采集时长为 5 秒, 共获得 1000 个数据点, 并支持以 5 秒为单位进行追加采集。数据采集完成后, 程序会根据受试者在每次采集时所选择的动作姿态编号, 为每一段数据样本赋予相应的类别标签(见表 1), 从而构建用于后续模型训练的姿态识别数据集。

**Table 1.** 16 postures and data labels

**表 1.** 16 种姿态及其数据标签

序号	姿态	数据标签
1	站姿, 双手放在身体两侧	0
2	站姿, 双臂在胸前交叉	1
3	站姿, 右手顶着下巴	2
4	站姿, 右臂靠在柱子上	3
5	站姿, 双手放在背后	4
6	站姿, 右臂扶栏杆	5
7	站姿, 双臂抱玩偶	6
8	站姿, 双臂抱箱子	7
9	坐姿, 使用手机	8
10	坐姿, 趴桌子写字	9
11	坐姿, 坐直写字	10
12	坐姿, 双臂放扶手上	11
13	坐姿, 双臂身前交叉	12
14	坐姿, 驼背坐下	13
15	坐姿, 趴桌子睡觉	14
16	坐姿, 双手抱脸	15

## 4.2. 人体姿态模型训练与识别

将采集到的 16 类姿态动作对应的 11 通道柔性光波导传感器数据分别通过 SVM(支持向量机)与随机森林两种机器学习模型训练, 流程主要包括特征提取、类别平衡、数据集划分、特征归一化、模型训练与评估等步骤。

输入原始传感器信号后首先进行滑动窗口分割, 时间窗为 30, 步长也为 30, 避免重叠。从每个窗口中提取时域统计特征(均方根、平均绝对值), 将 11 通道连续信号转换为 22 维特征向量, 以大幅降低噪声影响。随后进行类别平衡, 以最小样本数进行降采样, 消除不同姿态之间样本数存在的差异, 避免模型偏向多数类。将平衡后的数据集划分为训练集(80%)和测试集(20%), 并对训练集以添加小幅度高斯噪声的方式进行数据增强, 增加样本多样性、抑制过拟合; 测试集保持不变, 确保评估公正。

特征归一化使用 MinMaxScaler 进行, 采用最小-最大归一化的方法对数据进行缩放。首先, 基于训练集计算每个特征维度的最小值  $x_{\min}$  与最大值  $x_{\max}$ , 然后利用公式(1)将训练集的所有特征线性映射到[0, 1]区间内。完成拟合后, 使用训练集上得到的同一组  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  对测试集进行相同的变换, 以确保训练与测试数据处于同一尺度, 避免信息泄露。拟合的归一化参数以文件形式保存, 以便在后续对未知样本进

行预测时, 采用相同的预处理方式。

$$x_{\text{scaled}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

模型训练阶段使用随机森林和 SVM 分类器, 其中随机森林并行构建多棵决策树并集成投票, SVM 求解最优分类超平面。两种模型均设置正则化或平衡参数以控制过拟合。

由于在前面进行数据采集时, 每个姿态是分开采集的, 经测试, 不同姿态的区分度较高。为了防止过拟合(模型学习了数据中的噪声和波动), 调整了模型训练中的一些参数: 对于 SVM 模型, C 值设置得很低(0.075), 且使用线性核(linear); 对于随机森林模型, 增大 min\_samples\_leaf 以及 min\_samples\_split, 减小 max\_depth。

SVM 与随机森林的混淆矩阵(图 10)显示, 多数样本分类正确, SVM 标签 7(抱箱子)有 13%错误预测为标签 0(双手放在身体两侧), 随机森林标签 1(双手胸前交叉)有 5%错误预测为标签 2(手顶下巴), 错误的原因可能是不同的动作姿态均包含前臂受压与肘关节弯曲两种动作模式, 因而存在一定的相似度。学习曲线(图 11)中, SVM 训练与交叉验证得分随样本增加趋近且差距小, 拟合与泛化稳健, 随机森林在少样本时得分快速提升, 后两得分几乎重合, 有限样本下拟合高效且泛化优异。分类指标(表 2)层面, 随机森林 10 折交叉验证平均得分更高、标准差更小, 性能更优更稳定; SVM 训练与测试准确率接近, 泛化表现稳健。

Table 2. Classification accuracy for 16 postures

表 2. 16 类姿态分类准确率

指标	SVM	随机森林
10 折交叉验证平均得分	0.9724	0.9988
10 折交叉验证标准差	0.0153	0.0036
训练准确率	0.9916	0.9988
测试准确率	0.9904	0.9717

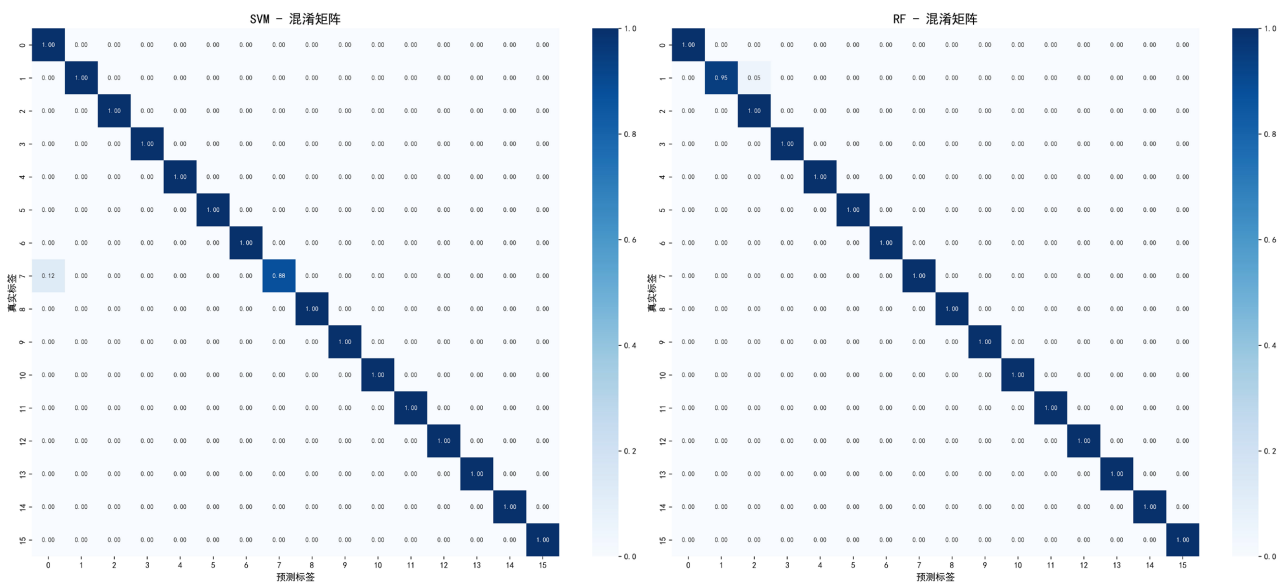


Figure 10. Confusion matrix of classification for 16 postures

图 10. 16 类姿态分类混淆矩阵

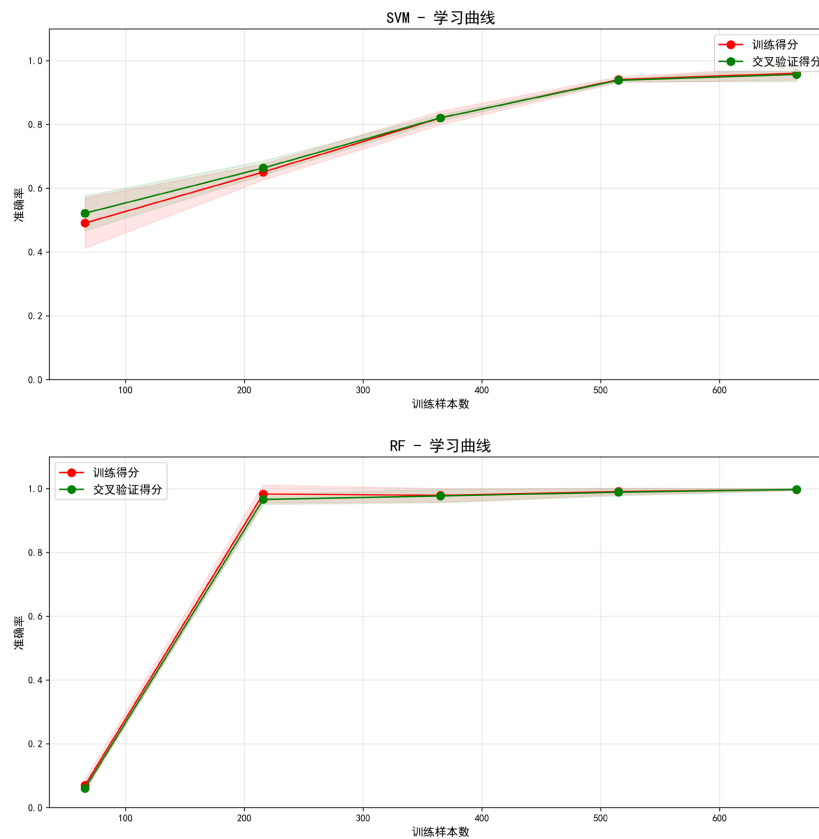


Figure 11. Learning curve of classification for 16 postures  
图 11. 16 类姿态分类学习曲线

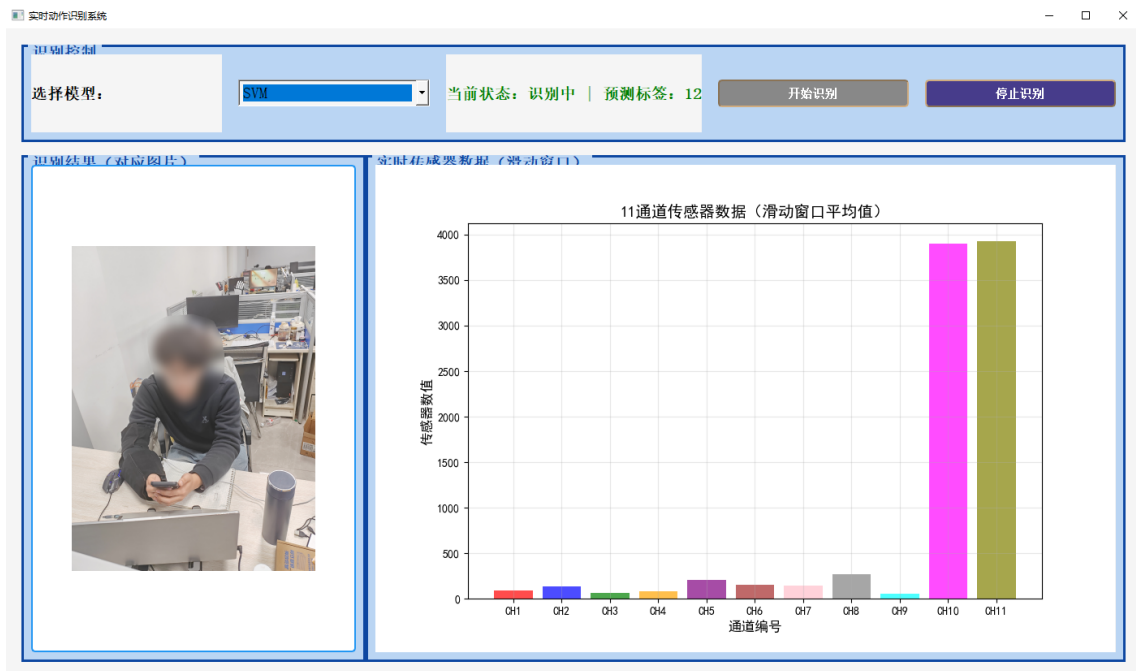


Figure 12. Interface of posture real-time recognition program  
图 12. 姿态实时识别程序界面

利用训练的模型, 进行 16 种人体姿态的实时分类识别。识别程序的图形界面如图 12 所示。程序启动后, 从界面顶部的下拉菜单中选择使用的机器学习模型, 点击“开始识别”按钮, 程序加载模型, 并通过串口从感知袖套接收数据。受试者将袖套佩戴在右臂上, 做出图 8 所示的 16 种动作之一, 左侧图片区域将显示当前识别出的姿态标签对应的图片, 右侧通过柱状图显示 11 个传感器通道数据的滑动窗口平均值, 顶部状态标签同步显示识别状态和预测的类别编号。结束识别时点击“停止识别”按钮, 程序断开传感器连接并清空所有显示内容。

## 5. 总结

本研究针对传统刚性传感器在上肢运动感知中面临的信号失真与机械不匹配问题, 设计并制作了两种具有不同感知特性的柔性光波导传感器, 利用光信号在形变过程中的能量损失实现对外部机械变形的灵敏响应。二者分别以 Dragon Skin 20 和弹性软管为外壳, 而透明核芯均为 Clear Flex 30。在此基础上, 将圆形与矩形光波导传感器集成于感知袖套, 构建了包含前臂交叉阵列与肘部条形传感器的分布式传感架构, 并完成光电转换、数据采集与柔性电路封装。通过采集 11 个传感器通道在 16 种姿态下的信号数据, 结合 SVM 与随机森林算法训练模型并进行实时识别, 实验结果表明两类模型均展现出较高的识别精度与泛化能力。该感知袖套系统在运动康复、人机交互与职业健康监测等场景中具有重要的应用潜力。

为了客观评估本工作的性能与特点, 我们选取了近年来发表的几项代表性的上肢感知的研究工作进行多方面的对比, 这些工作分别采用了不同的传感技术, 包括 IMU、sEMG、电容织物等, 如表 3 所示。

**Table 3.** Performance comparison of this work with other upper limb motion sensing systems

**表 3.** 本工作与其他上肢运动感知系统的性能对比

对比维度	本研究	[2]	[3]	[5]
传感器技术	柔性光波导	九轴 IMU + VR	sEMG	电容式
传感器数量	11 (前臂 8 + 肘部 3)	17 (IMU 数量)	8 (Myo 臂环)	22 (11 × 2 阵列)
识别、感知能力	16 种人体姿态分类	关节欧拉角输出	手部、上肢动作	4 类滑动手势分类
识别精度	高(SVM)	高(姿态识别)、 中(位置跟踪)	较高(简单手势分类)	较高(LSTM)
抗电磁干扰能力	本质抗电磁干扰	较差(内置磁力计)	较差(无电磁屏蔽)	较差(无电磁屏蔽)
功耗	低(LED + 光敏二极管)	较高(IMU + VR)	较低(电极传感)	低(无源传感)
成本	中(定制柔性光波导)	高(动捕服)	与电极数量有关	低(导电针织面料)
舒适性	高(柔性传感器 + 织物)	中等(连续 3 小时 无操控疲劳)	中等(臂环式穿戴便捷)	高(柔性传感器 + 织物)
主要优势	高灵敏度、本质抗干扰、 穿戴舒适	实时性高、沉浸感强、 开发调试便捷	应用场景广、 可监测肌肉疲劳	结构简单、穿戴舒适、 支持实时识别
主要不足	动态范围有限、 制造一致性有待提升	容易漂移、开环 无反馈、易受干扰	个体差异明显、 抗干扰差、成本难以平衡	功能单一

通过对比分析可以清晰地凸显本工作的优势与不足。在优势方面, 本工作在动作分类的准确率方面与基于 IMU 的高精度系统相当, 且显著优于部分基于 sEMG 和电容式的系统, 这得益于柔性光波导传感器稳定的光信号输出和袖套精密的传感阵列设计; 同时, 光学传感本质上的抗电磁干扰特性保证了系统在复杂环境下的稳定性, 这是基于电信号的 sEMG 和电容式系统所不具备的。本工作将传感器与织物、海绵等材料集成, 通过柔性电路板进行信号汇总, 实现了轻量化的袖套形态, 提高了集成度和可靠性, 避免了 IMU 刚性模块带来的异物感。在传感材料的协同设计上, 本研究巧妙地利用了两种光波导传感器

的特性差异, 将抗缠绕性能好的圆形波导用于横向缠绕, 将高灵敏度的矩形波导用于纵向压力感知, 从而实现了对复杂形变的解耦与高效感知。

本工作也存在一定的改进空间。当前系统主要针对静态或准静态姿态识别, 对于快速、连续的运动, 传感器的响应速度和数据采集频率可能成为瓶颈, 未来可通过优化光电模块的响应速度、提高采样率并调整数据采集的方式来增强动态运动识别能力。对于柔性光波导传感器而言, 圆形光波导中核芯材料的固化收缩率较大, 手工制作导致成功率和精度较低, 且无法避免个体间微小差异, 未来可探索使用 3D 打印技术或自动化工艺, 以提高一致性和可重复性。每个传感器目前使用独立的 LED 和光电二极管, 11 个通道的连续数据采集需要较多的模拟输入端口, 未来可通过时分复用等方式利用单个接口采集多个传感器的信号。

## 基金项目

- 1) 国家重点研发项目(2022YFF1202502): 多模态运动信息高效感知与意图精准识别技术。
- 2) 辽宁省科技创新团队领军人才项目(LJ222410142060): 基于多模态多传感器融合导航的复合机器人系统研究。

## 参考文献

- [1] 全球增长洞察咨询公司. 可穿戴传感器市场规模、趋势和展望报告 2035 [R]. 2026.
- [2] Girard, C., Calderon, D., Lemus, A., Ferman, V. and Fajardo, J. (2020) A Motion Mapping System for Humanoids That Provides Immersive Telepresence Experiences. 2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Barcelona, 12-15 February 2020, 165-170. <https://doi.org/10.1109/icmre49073.2020.9065155>
- [3] Xu, H. and Xiong, A. (2021) Advances and Disturbances in sEMG-Based Intentions and Movements Recognition: A Review. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 13019-13028. <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3068521>
- [4] 冯智萍, 向晨星, 邱宥然, 等. 导电水凝胶柔性力学传感器: 材料设计、性能机制与多功能应用[J]. 化学进展, 2026, 38(3): 479-501.
- [5] Celik, I., Cetin, M.S., Ozlem, K., Atalay, O., Atalay, A.T. and Ince, G. (2024) Gesture Recognition on Textile-Based Pressure Sensor Array. 2024 5th International Conference in Electronic Engineering, Information Technology & Education (EEITE), Chania, 29-31 May 2024, 1-5. <https://doi.org/10.1109/eeite61750.2024.10654416>
- [6] Wang, X., Li, Z. and Su, L. (2024) Soft Optical Waveguides for Biomedical Applications, Wearable Devices, and Soft Robotics: A Review. *Advanced Intelligent Systems*, **6**, Article 2300482. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300482>
- [7] Fujiwara, E., Wu, Y.T., dos Santos, M.F.M., Schenkel, E.A. and Suzuki, C.K. (2017) Development of a Tactile Sensor Based on Optical Fiber Specklegram Analysis and Sensor Data Fusion Technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, **263**, 677-686. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.07.031>
- [8] Jiang, C., Zhang, Z., Pan, J., Wang, Y., Zhang, L. and Tong, L. (2021) Finger-Skin-Inspired Flexible Optical Sensor for Force Sensing and Slip Detection in Robotic Grasping. *Advanced Materials Technologies*, **6**, Article 2100285. <https://doi.org/10.1002/admt.202100285>
- [9] 刘杨, 张道辉, 杨青铭, 等. 基于光波导的传感驱动一体化软体康复手[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(9): 115-119.
- [10] Huang, X., Yin, Z. and Li, M. (2022) A Novel Stretchable and Flexible Sensor Using Graphite-Added Optical Waveguide for Human Motion Detection. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 14929-14936. <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3188115>