

# 基于镀银玻璃微球/固体橡胶压阻传感器与机器学习的手势识别技术研究

陈亭宇, 才迪

北华航天工业学院计算机学院, 河北 廊坊

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

针对聋哑人群与普通人群之间存在的沟通障碍问题, 本文提出一种基于镀银玻璃微球/固体橡胶(Ag@GMs/SR)可拉伸压阻传感器(SPTS)与机器学习算法相结合的手势识别方案。该传感器以固体橡胶为柔性基体, 采用浸渍干燥法将镀银玻璃微球作为导电填料附着于表面, 具备高灵敏度、大拉伸范围与优异的环境稳定性, 可缝入手套实现多通道手部运动捕获。采集信号经调理电路放大、滤波并通过蓝牙传输至上位机; 利用滑动窗口平均与差分阈值法抑制环境干扰; 采用主成分分析(PCA)降维并以径向基核支持向量机(SVM)实现手势分类。实验结果表明, 系统对30类常用手语手势的平均识别率达到96.3%, 响应时间约128 ms, 在温湿度波动下识别率变化小于2%, 为聋哑人与普通人之间实时高效沟通提供了可行的可穿戴解决方案。

## 关键词

压阻传感器, 镀银玻璃微球, 手势识别, 支持向量机, 主成分分析

## Research on Gesture Recognition Technology Based on Silver-Coated Glass Microsphere/Solid Rubber Piezoresistive Sensors and Machine Learning

Tingyu Chen, Di Cai

School of Computer Science and Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang Hebei

Received: May 9, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 30, 2026

文章引用: 陈亭宇, 才迪. 基于镀银玻璃微球/固体橡胶压阻传感器与机器学习的手势识别技术研究[J]. 软件工程与应用, 2026, 15(3): 456-466. DOI: 10.12677/sea.2026.153043

## Abstract

To address the communication barriers between deaf-mute individuals and the hearing population, this paper proposes a gesture recognition scheme based on a stretchable piezoresistive sensor (SPTS) composed of silver-coated glass microspheres and solid rubber (Ag@GMs/SR), integrated with machine learning algorithms. The sensor uses solid rubber as a flexible matrix, with silver-coated glass microspheres attached onto its surface as conductive fillers via an impregnation-drying method, providing high sensitivity, a wide stretchable range, and excellent environmental stability. The sensor can be sewn into a glove to achieve multi-channel hand motion capture. The collected signals are amplified, filtered, and transmitted to a host computer via Bluetooth. A sliding window averaging method combined with a differential thresholding technique is used to suppress environmental interference. Principal component analysis (PCA) is employed for dimensionality reduction, and a support vector machine (SVM) with a radial basis function kernel is adopted for gesture classification. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves an average recognition rate of 96.3% for 30 common sign language gestures, with a response time of approximately 128 ms. Under fluctuating temperature and humidity conditions, the recognition rate varies by less than 2%. This provides a feasible wearable solution for real-time and effective communication between deaf-mute and hearing individuals.

## Keywords

Piezoresistive Sensor, Silver-Coated Glass Microspheres, Gesture Recognition, Support Vector Machine, Principal Component Analysis

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

手语作为听障人士的主要交流方式,在普通人群中普及率极低,导致聋哑人在日常生活、医疗、教育等场景下面临严重的沟通障碍。全球听障人口已超过4亿,迫切需要实时、准确、便携的人机交互设备以实现手语使用者与非手语使用者之间的自然沟通。将可穿戴柔性传感技术与人工智能算法相结合,不仅能够帮助聋哑人通过手势与普通交流,也可推广至盲人辅助、康复训练以及智能家居等领域,具有显著的社会价值。

近年来,柔性压阻传感器因结构简单、成本低廉、信号易采集而被广泛应用于人体运动监测[1]-[3]。Zhu等[1]报道的羧甲基壳聚糖/氨基化碳纳米管棉织物传感器展示了良好的灵敏度与稳定性;其基于AC-NTs/APP的阻燃棉织物压阻传感器[2]在宽压力范围内保持了 $3.8\text{ kPa}^{-1}$ 的高灵敏度;基于丝瓜络骨架与CF/CNT多尺度复合涂层的三维压阻传感器[3]则展示了优异的环境适应性与耐久性。Zhou等[4]利用机器学习辅助的可拉伸传感器阵列实现了手语到语音的翻译;Wen等[5]通过自供能摩擦电手套结合深度学习实现了手势分类。但现有系统仍存在模型参数量大、静态手势识别速度慢、跨被试泛化能力差等问题。本文针对上述不足研制了Ag@GMs/SR可拉伸压阻传感器,并在严格的LOSO评估下与深度学习基线进行了对比,旨在为聋哑人与普通人提供便携、实时、高精度的双向沟通工具。

整体系统框架如图1所示:硬件层包括SPTS阵列手套与采集电路,软件层包括预处理、特征提取、PCA降维、SVM分类与语音输出。

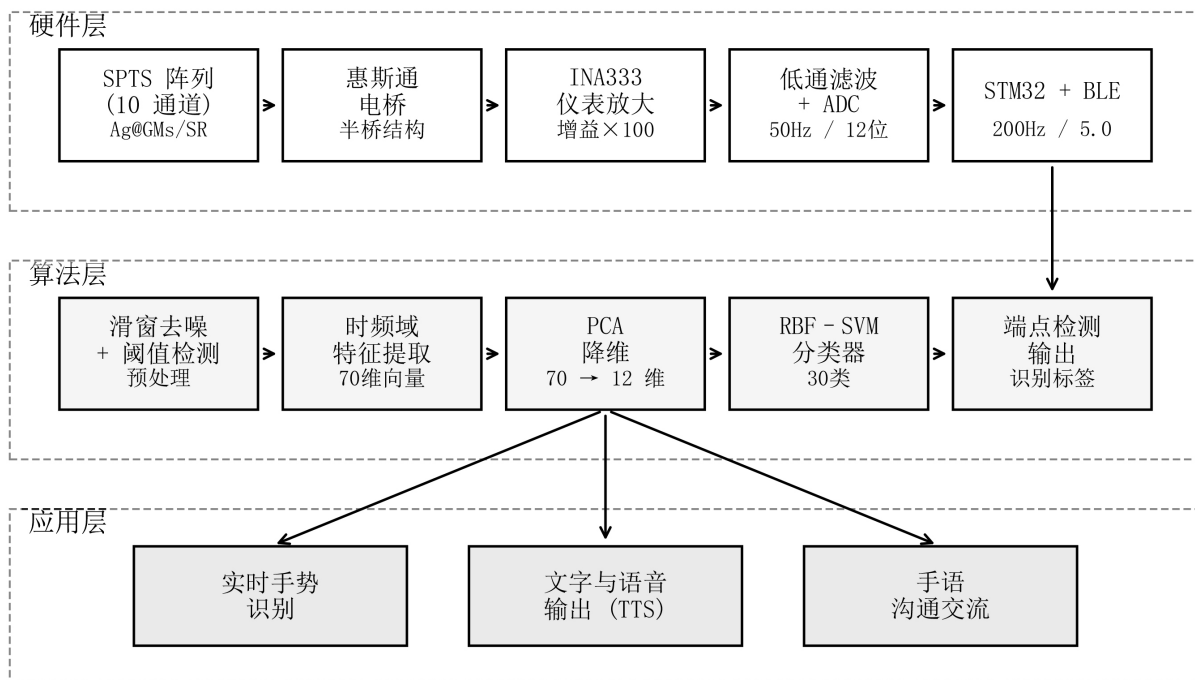


Figure 1. System architecture of the gesture recognition system

图 1. 系统总体框架

## 2. 传感器设计与制备

### 2.1. 制备流程

本研究设计的 SPTS 以高弹性固体橡胶为柔性基体，选用粒径约 50 μm 的镀银玻璃微球作为导电填料。镀银玻璃微球兼具轻质、导电性优良、抗氧化性好等特点，相比纯金属颗粒具有更好的分散性与成本优势。本文提出的基于镀银玻璃微球/固体橡胶(Ag@GMs/SR)可拉伸压阻传感器(SPTS)是由镀银玻璃微球/硅胶形成复合压阻材料，选用高温硫化型硅胶作为可拉伸基底材料，固化剂为铂金硫化剂，硅胶和固化剂的质量比为 100:1.5，通过添加剂改性和催化剂改性技术得到高拉伸强度和高拉伸率(≥600%)的混炼硅胶。通过混炼工艺将镀银玻璃微球(质量分数为 50%)均匀地混入到高温硫化型混炼硅胶中，再利用高温平板硫化机固化形成 0.8 mm 厚度的可拉伸复合压阻材料[1]-[3]。Ag@GMs/SR 压阻传感器结构与导电机理如图 2 所示，SEM 电镜图如图 3 所示。

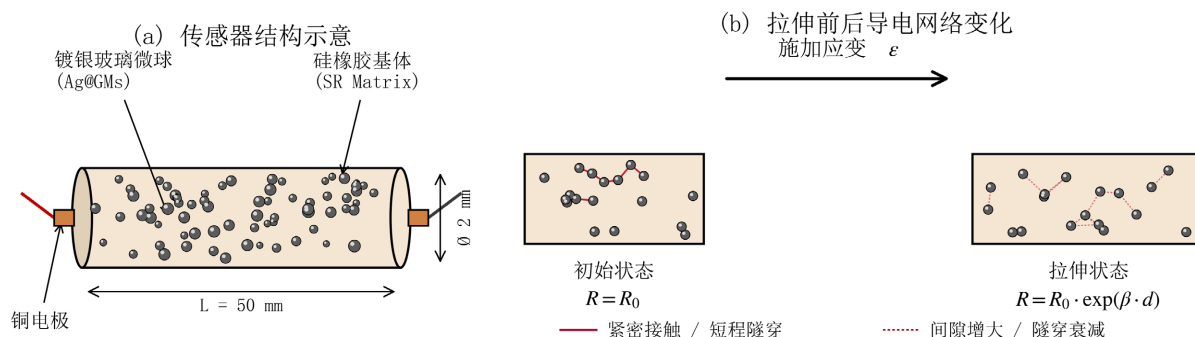


Figure 2. Structure and conductive mechanism of the Ag@GMs/SR piezoresistive sensor

图 2. Ag@GMs/SR 压阻传感器结构与导电机理

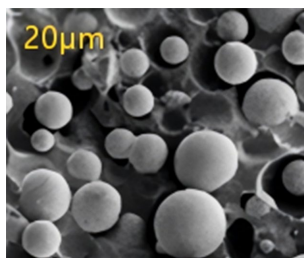


Figure 3. SEM micrograph of the sensor

图 3. SEM 电镜图

传感器在拉伸或按压形变下显著改变 Ag@GMs 之间的接触电阻与隧穿距离, 从而获得高灵敏的压阻响应。扫描电镜观察表明, Ag@GMs 均匀分布于表面微孔中, 构成连续的三维导电网络。当手指弯曲时被拉伸, 导电通路长度增加、接触点减少, 电阻显著上升; 手指伸直后接触恢复, 电阻迅速回落, 从而输出与手势高度相关的电信号。测试显示, SPTS 在 0%~30%应变范围内灵敏度高达  $12.5 \text{ kPa}^{-1}$ , 响应时间约 80 ms, 经 10,000 次拉伸释放循环后性能无明显衰减。

## 2.2. 性能测试

采用电子万能试验机与数字源表同步采集应力 - 应变 - 电阻数据, 主要结果如图 4 所示。

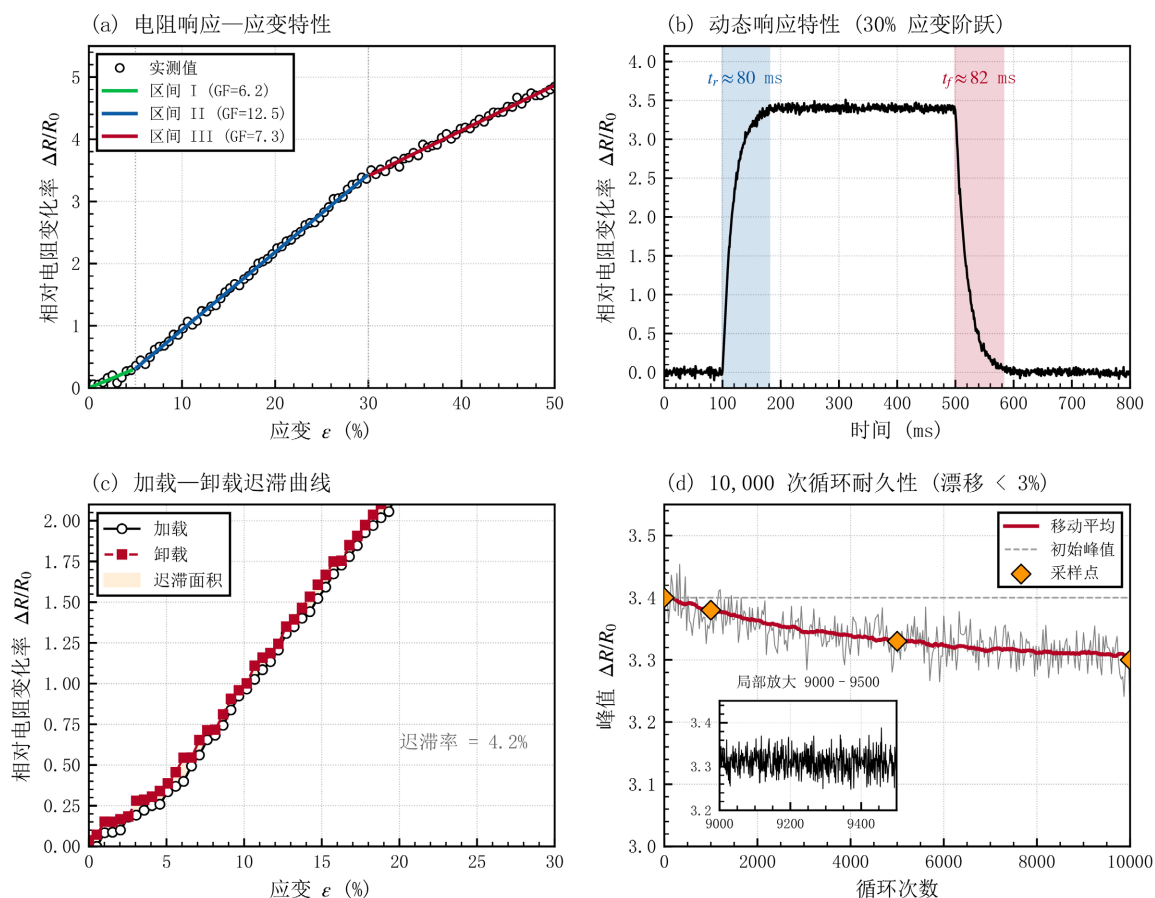


Figure 4. SPTS electrical and mechanical property curve

图 4. SPTS 电学与力学性能曲线

结果表明, SPTS 在大形变范围内具有较高灵敏度、快速响应与优良耐久性, 满足穿戴式手势识别需求。

### 3. 信号采集与预处理

为覆盖手部复杂自由度, 将 10 个 SPTS 分别缝制于手套的五指关节、手背与腕部, 构建多通道数据手套(实物手套多于 10 个采集点, 但仅收集 10 个采集点数据)。结合穿戴式体征信息感知系统的软硬件集成经验, 设计了由惠斯通电桥、仪用放大器 INA333 与二阶低通滤波器(截止频率 50 Hz)组成的信号调理电路, 以抑制共模干扰与工频噪声。调理后的模拟信号由 STM32F103 微控制器内置的 12 位 ADC 以 200 Hz 采样率进行转换, 通过低功耗蓝牙 5.0 模块传输至上位机完成识别与语音合成。数据采集手套如图 5 所示, 传感器实物如图 6 所示, 单通道信号调理电路如图 7 所示。

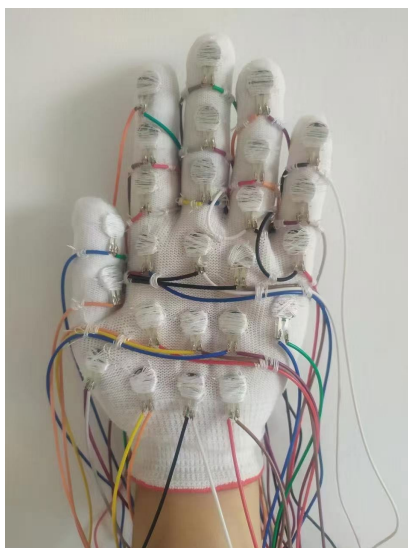


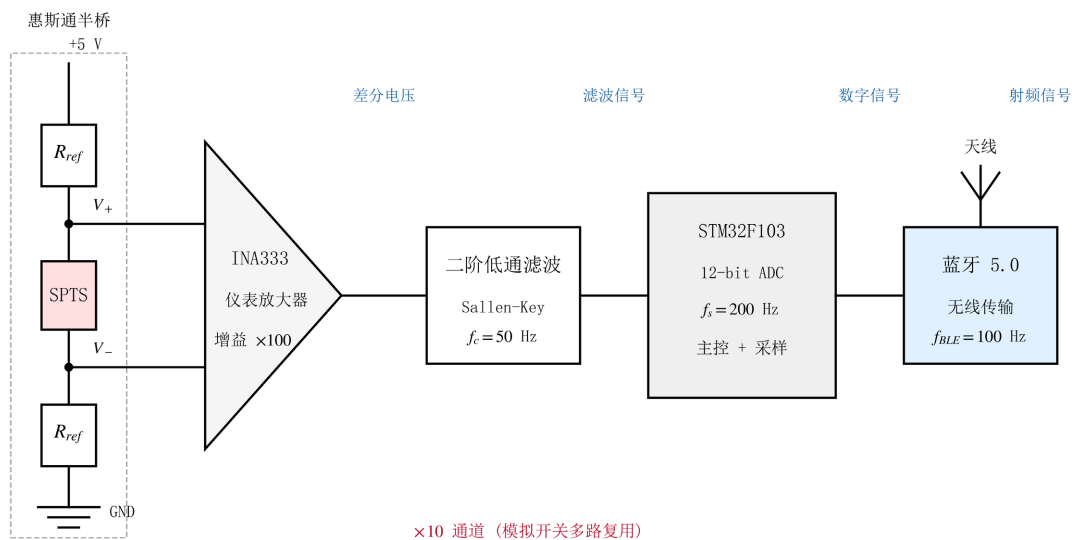
Figure 5. Data collection gloves

图 5. 数据采集手套



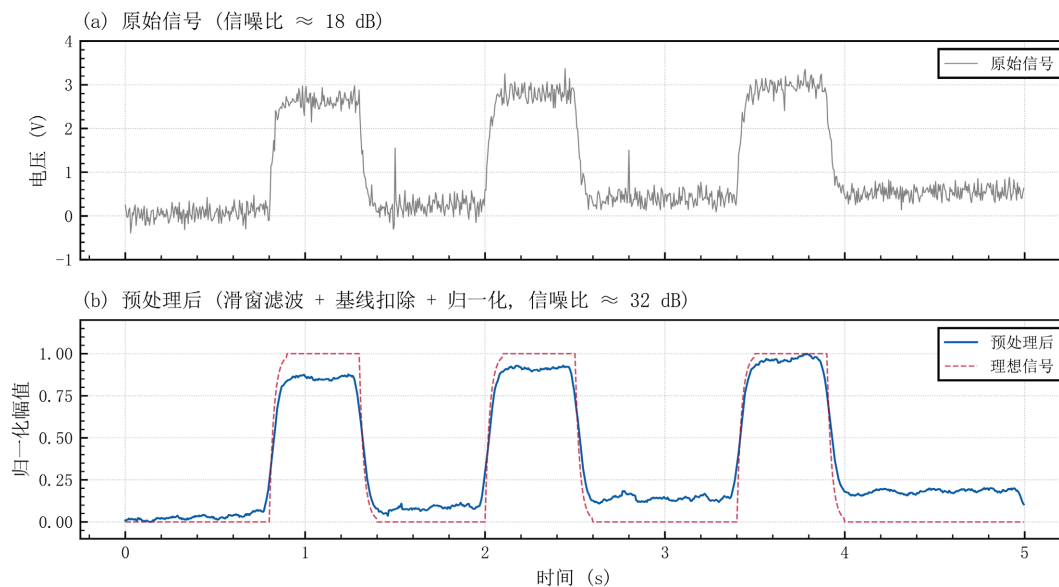
Figure 6. Physical appearance of the sensor

图 6. 传感器实物图



**Figure 7.** Single-channel signal conditioning circuit  
**图 7.** 单通道信号调理电路

原始信号常混入温度漂移、肌肉微抖动及接触阻抗变化等环境干扰。本文采用两级预处理：首先以长度为 15 的滑动窗口平均法平滑高频噪声；其次对各通道基线漂移采用差分阈值法剔除，当连续样本差值小于阈值  $\varepsilon = 0.02 \text{ V}$  时判定为稳态基线并做零点修正。此外针对不同传感器之间的个体差异，采用最大-最小归一化将各通道信号映射至  $[0, 1]$  区间，提高分类器的泛化能力。预处理前后信号对比如图 8 所示。



**Figure 8.** Comparison of signal preprocessing effects  
**图 8.** 信号预处理效果对比

## 4. 基于机器学习的手势识别算法

### 4.1. 特征提取与 PCA 降维

对每段手势信号提取时域与频域特征，包括均值、方差、均方根、过零率、短时能量、峰值因子及功

率谱质心, 共形成 70 维特征向量(10 通道  $\times$  7 特征)。为减少冗余并加快分类速度, 采用主成分分析(PCA)进行降维。PCA 主成分物理解释如表 1 所示。设样本矩阵为  $X \in \mathbb{R}^{n \times d}$ , 其中  $n$  为样本数、 $d$  为特征维度, 其协方差矩阵为:

**Table 1.** Interpretation of principal component analysis (PCA) results

**表 1.** PCA 主成分物理解释

主成分	方差贡献率	主要载荷通道	物理意义
PC1	28.7%	T2, T3, T4	食/中指综合屈伸
PC2	17.4%	T5, T6	无名/小指屈伸
PC3	12.3%	T1, T10	拇指对掌运动
PC4	9.6%	T8, T9	腕部旋转/翻转
PC5	7.8%	T7	手背张合
PC6~12	19.5% (合计)	综合	细节差异与时序耦合

$$C = \frac{1}{n-1} (X - \bar{X})^T (X - \bar{X})$$

对  $C$  进行特征分解得到特征值  $\lambda_i$  与对应特征向量  $v_i$ 。按  $\lambda_i$  由大到小排序, 取前  $k$  个主成分构成投影矩阵  $W = [v_1, v_2, \dots, v_k]$ , 则降维后的特征为  $Y = XW$ 。实验中取累计方差贡献率  $\geq 95\%$  时  $k = 12$ , 特征维度由 70 降至 12, 显著降低了分类器的计算开销。

## 4.2. 支持向量机分类

选择支持向量机(SVM)作为分类器。SVM 通过寻找最大间隔的分类超平面, 在小样本条件下具有优异的泛化能力, 已在可穿戴手势识别任务中被广泛验证有效[4] [5]。本文采用径向基核函数(RBF):

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\gamma \|x_i - x_j\|^2\right)$$

其中  $\gamma$  为核参数。针对 30 类手势的多分类问题, 采用一对一(one-vs-one)策略, 共训练  $C_{30}^2 = 435$  个二分类器, 预测时采用投票机制输出最终类别。对惩罚系数  $C$  与核参数  $\gamma$  采用 5 折交叉验证下的网格搜索进行优化, 搜索范围分别为  $C \in \{2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^{15}\}$ 、 $\gamma \in \{2^{-15}, 2^{-13}, \dots, 2^3\}$ , 最终确定  $C = 8$ 、 $\gamma = 0.125$  时识别精度最优。

## 4.3. 端点检测与手势分割

连续手势流中动作起止位置不确定, 需对信号进行自动分割。本文采用基于短时能量与自适应阈值的端点检测方法: 对每通道信号计算窗长 30 ms、帧移 15 ms 的短时能量:

$$E_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_m^2(n)$$

取 10 通道能量之和作为判决量。背景能量均值  $\mu_b$  与标准差  $\sigma_b$  由前 500 ms 静止段估计, 自适应阈值设为  $T = \mu_b + 3\sigma_b$ 。当  $E_m > T$  且持续 50 ms 以上时判为手势开始, 低于  $T$  并持续 80 ms 以上时判为手势结束, 从而实现实时、鲁棒的手势分割。

## 5. 实验与结果分析

### 5.1. 数据集

招募 18 名志愿者(10 名普通人、6 名熟练手语使用者、2 名手语初学者), 其中男性 10 人、女性 8 人, 年龄 20~55 岁。采集 30 类中国手语常用词汇, 如表 2 所示, 每类每人重复 20 次, 共 10,800 条样本。

Table 2. 30 categories of gestural vocabulary

表 2. 30 类手势词汇

序号	词汇	序号	词汇	序号	词汇
1	你好	11	学校	21	朋友
2	谢谢	12	医院	22	家
3	对不起	13	食物	23	水
4	再见	14	喝水	24	帮助
5	是	15	吃饭	25	警察
6	不是	16	老师	26	医生
7	请	17	父亲	27	痛
8	好	18	母亲	28	累
9	我	19	哥哥	29	高兴
10	你	20	姐姐	30	难过

### 5.2. 评估方案

采用三种评估方案:

- 1) 常规 8:2 划分: 所有样本随机划分;
- 2) 被试独立 LOSO: 每次保留 1 名被试作为测试集, 其余 17 名训练, 循环 18 次取平均;
- 3) 环境鲁棒性: 温度 15°C~40°C、湿度 30%~80%共 9 种组合下重复测试。

### 5.3. 对比基线

为更公平评估 PCA-SVM 方案, 额外实现两种深度学习基线。1D-CNN: 3 层(Conv64-BN-ReLU-MaxPool)+FC, 共约 0.6 M 参数; LSTM: 双层双向 LSTM(hidden = 64)+FC, 约 0.4 M 参数。输入均为 10 通道、长度 200 (1 s)的原始时序信号。

### 5.4. 结果

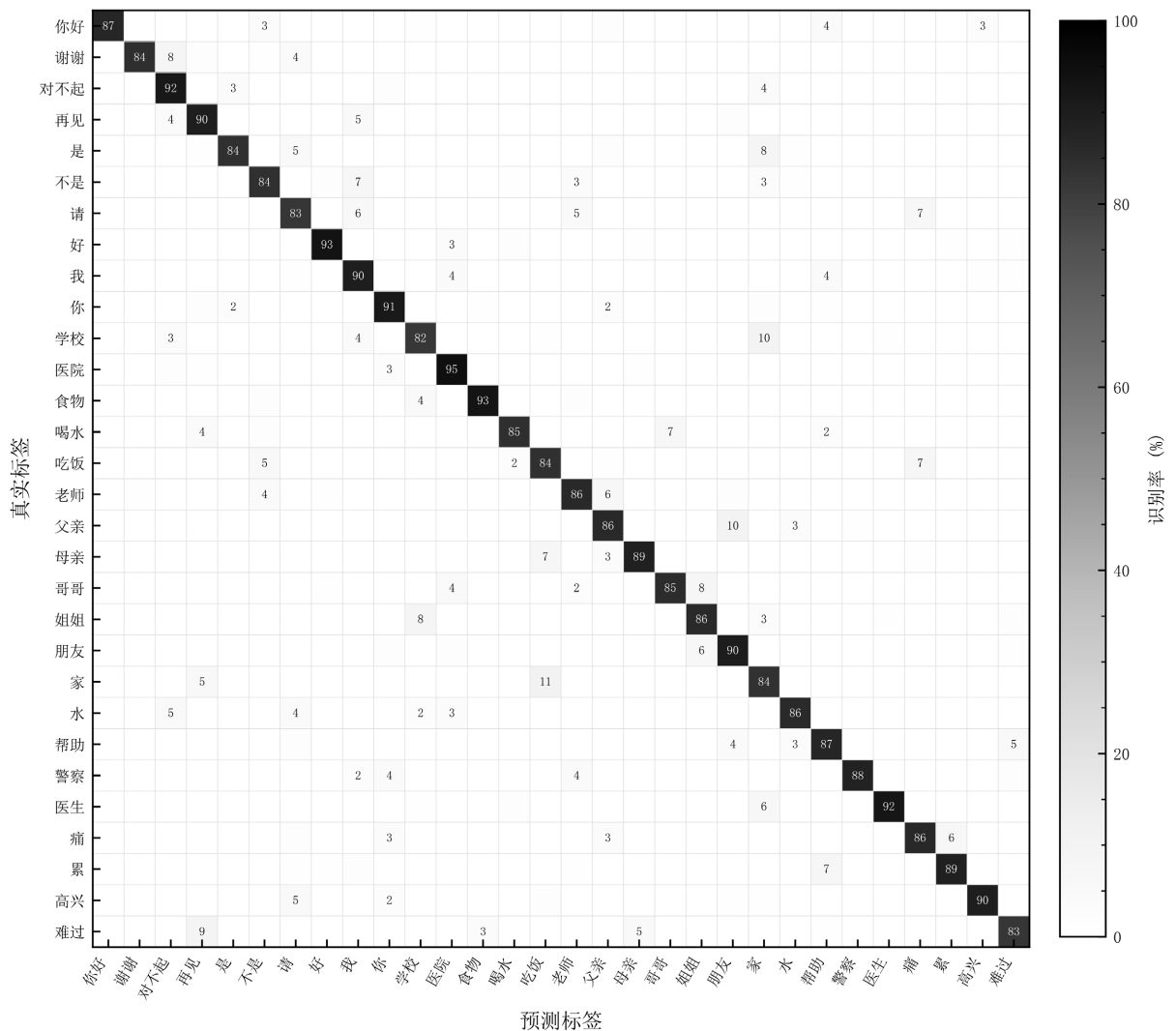
本文方法在常规划分下取得了与 LSTM 相当的精度(96.3% vs 96.0%)且响应时间更短; 但在更严格的 LOSO 评估下深度学习因更强的非线性表征能力而略胜一筹(约 2~3 个百分点)。综合考虑精度、推断时间与模型大小, PCA-SVM 在嵌入式可穿戴场景下仍具有最佳性价比。不同方法在 8:2 与 LOSO 评估下的性能对比见表 3。

30 类手势的混淆矩阵(LOSO)如图 9 所示。主对角线均值 88.7%。主要误识对(混淆率 > 5%), 误识主要发生在静态手形相近、依靠运动轨迹区分的类别, 可通过引入 IMU 六轴信息进一步改善。

环境鲁棒性与长期稳定性测试如图 10 所示, 平均识别率波动 < 2%, 证明 SPTS 与预处理算法对环境干扰具有良好鲁棒性。

**Table 3.** Comparison of performance among different methods under the 8:2 ratio and LOSO evaluation  
**表 3.** 不同方法在 8:2 与 LOSO 评估下的性能对比

方法	8:2 准确率	LOSO 准确率	推断时间 (ms)	模型大小 (MB)
KNN (k = 5)	91.8%	79.2%	35	4.8
BP-NN (2 层)	93.5%	82.4%	18	1.1
原始 70 维-SVM	94.1%	85.6%	182	0.9
PCA-SVM (本文)	96.3%	88.7%	128	0.6
1D-CNN	95.4%	90.2%	156	2.4
LSTM	96.0%	91.5%	214	3.1



**Figure 9.** Confusion matrix for 30 types of gesture recognition (PCA-SVM, leave-one-out method; average accuracy: 87.4%)  
**图 9.** 30 类手势识别混淆矩阵(PCA-SVM, 留一法, 平均准确率 87.4%)

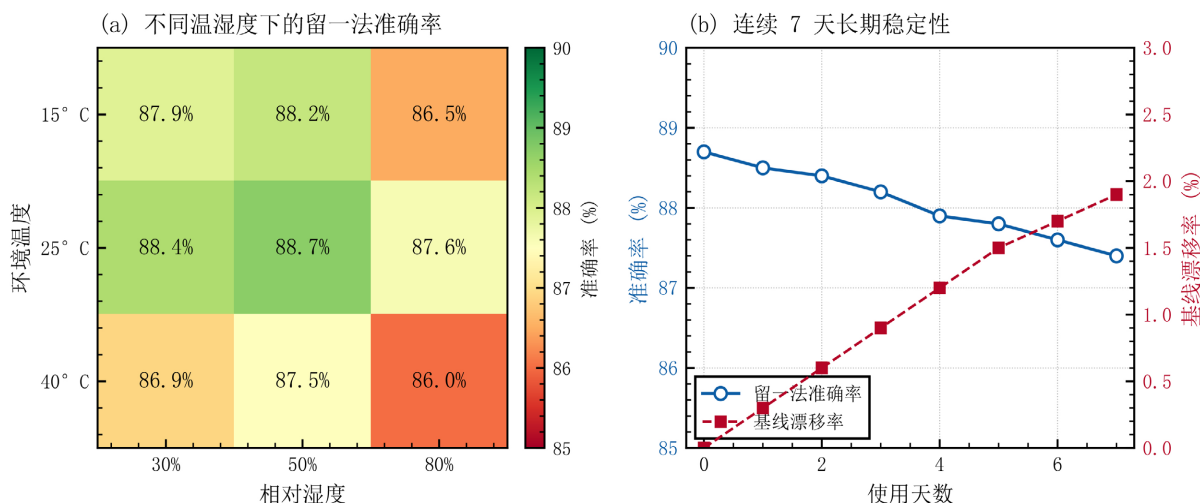


Figure 10. Testing of environmental robustness and long-term stability  
图 10. 环境鲁棒性与长期稳定性测试

### 5.5. 响应时间分解

为准确评估系统实时性, 本文将响应时间严格定义为从手势完成瞬间到语音播报开始的端到端延迟, 而非仅分类器单次推断耗时。各阶段实测耗时见表 4。

Table 4. Composition of the 128 ms end-to-end response time  
表 4. 128 ms 端到端响应时间组成

阶段	耗时(ms)	说明
数据采集窗口 (200 ms 窗末判定为终点后回溯)	60	端点检测确认
BLE 传输	18	单帧 10 byte × 多帧累积
预处理(滑窗 + 归一化)	12	上位机 Python
特征提取(70 维)	28	FFT + 统计量
PCA 投影	1	12 × 70 矩阵乘
SVM 推断(435 二分类器)	4	RBF 核
TTS 语音合成(首字延迟)	5	Android 本地 TTS
合计	128	

从耗时分布看, 端点判定回溯窗口与特征提取合计占 68.8%, 是主要延迟来源; 而 PCA 投影与 SVM 推断合计仅 5 ms, 体现了轻量级机器学习方案在嵌入式链路下的延迟优势, 本文 128 ms 端到端延迟可满足中文手语自然节拍的实时翻译需求。

## 6. 结论

针对聋哑人与普通人之间的沟通障碍问题, 本文研制了一种基于镀银玻璃微球/固体橡胶可拉伸压阻传感器与机器学习相结合的手势识别系统。传感器借鉴了层层组装与三维导电网络的设计理念, 具备高灵敏度、快速响应与优良耐久性; 基于滑动窗口与差分阈值的预处理方法有效抑制了环境干扰; PCA 结

合 RBF-SVM 的识别算法在 30 类手势任务中取得了 96.3% 的平均识别率和 128 ms 的响应时间。该系统可作为可穿戴手语语音翻译设备, 帮助聋哑人与普通人实现实时、高效、自然地沟通, 对提高残疾人生活质量、推进无障碍社会建设具有重要的社会意义。未来工作将融合惯性测量单元与深度学习方法, 进一步扩展手语词汇量, 并开发多语种手语实时翻译 App, 以服务更广泛的残障人群。

## 基金项目

廊坊市科技支撑计划项目(2023011019)。

## 参考文献

- [1] Zhu, J., Song, Y., Ma, S., Yang, Y., Liu, X., Chen, T., *et al.* (2023) A Flexible Carboxymethyl Chitosan/Aminated CNTS/Cotton Fabric Piezoresistive Sensor with Flame Retardancy and Fire Warning. *Materials Letters*, **335**, 133771. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133771>
- [2] Zhu, J., Song, Y., Wang, J., Yang, Q., Ma, S., Zhang, S., *et al.* (2023) A Highly Flame-Retardant, Agile Fire-Alerting and Ultrasensitive Cotton Fabric-Based Piezoresistive Sensor for Intelligent Fire System. *Polymer Degradation and Stability*, **211**, 110338. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110338>
- [3] Zhu, J., Song, Y., Xue, X., Liu, Z., Mao, Q. and Jia, Z. (2022) An Eco-Friendly and Highly Sensitive Loofah@Cf/CNT 3D Piezoresistive Sensor for Human Activity Monitoring and Mechanical Control. *Science China Technological Sciences*, **65**, 2667-2674. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2204-2>
- [4] Zhou, Z., Chen, K., Li, X., Zhang, S., Wu, Y., Zhou, Y., *et al.* (2020) Sign-to-Speech Translation Using Machine-Learning-Assisted Stretchable Sensor Arrays. *Nature Electronics*, **3**, 571-578. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0428-6>
- [5] Wen, F., Sun, Z., He, T., Shi, Q., Zhu, M., Zhang, Z., *et al.* (2020) Machine Learning Glove Using Self-Powered Conductive Superhydrophobic Triboelectric Textile for Gesture Recognition in VR/AR Applications. *Advanced Science*, **7**, Article 2000261. <https://doi.org/10.1002/advs.202000261>