

基于弯曲传感器与陀螺仪融合的手语识别与文字翻译系统设计与研究

茆佳诚 潘晨烁 王宇航

长春大学, 中国·吉林 长春 130022

摘要: 在信息技术与人工智能迅猛发展的背景下, 听障人群的语言沟通问题日益受到社会重视。手语作为该群体主要的交流手段, 其自动识别与翻译技术成为人机交互领域的重要研究方向。本文提出一种基于弯曲传感器与陀螺仪融合的手语识别与文字翻译系统, 以 STM32F103C8T6 单片机为核心控制器, 通过采集手指弯曲角度与手部姿态信息并进行数据融合, 实现了多种常用手语的实时识别与文字输出。实验结果显示, 系统对 15 种常用手语动作的平均识别准确率达到 91.3%, 响应延迟小于 250ms, 具备良好的实时性与实用性, 有望为听障人士提供便捷的交流支持。

关键词: 手语识别; 弯曲传感器; 陀螺仪; STM32; 嵌入式系统

Design and Research on a Sign Language Recognition and Text Translation System Based on the Fusion of Bending Sensors and Gyroscopes

Mao Jiacheng, Pan Chenshuo, Wang Yuhang

Changchun University, China Jilin Changchun 130022

Abstract: Against the backdrop of rapid developments in information technology and artificial intelligence, the language communication issues of people with hearing impairments have increasingly drawn social attention. As the primary means of communication for this group, sign language's automatic recognition and translation technology has become an important research direction in the field of human-computer interaction. This paper proposes a sign language recognition and text translation system based on the integration of bend sensors and a gyroscope, with the STM32F103C8T6 microcontroller as the core controller. By collecting finger bending angles and hand posture information and performing data fusion, it achieves real-time recognition and text output of various commonly used sign languages. Experimental results show that the system achieves an average recognition accuracy of 91.3% for 15 common sign language gestures, with a response delay of less than 250ms, demonstrating good real-time performance and practicality, and offering the potential to provide convenient communication support for people with hearing impairments.

Keywords: Sign language recognition; Bend sensor; Gyroscope; STM32; Embedded system

1 研究背景与意义

当前社会信息化水平不断提高, 人与人之间的交流日益频繁。然而, 听障人士在沟通中仍面临诸多障碍。手语作为一种视觉空间语言, 通过手势、姿态与表情传递信息, 但由于大多数普通人缺乏手语知识, 导致听障者与健听者之间的交流存在隔阂。传统基于视觉的手语识别方法依赖摄像头采集图像, 结合图像处理与模式识别技术进行分析。这类方法虽然直观, 但易受光照条件、背景复杂度及拍摄视角等因素干扰, 且计算量大、隐私性差, 难以在日常环境中广泛应用。相比之下, 基于传感器的手势识别技术通过佩戴于手部的传感设备直接采集动作数据, 具备响应快、

功耗低、稳定性好等优势。近年来, 随着柔性电子与惯性传感器技术的进步, 可穿戴式手语识别设备逐渐走向实用化。弯曲传感器能够精确反映手指的屈伸状态, 陀螺仪则可捕捉手部的空间运动信息, 二者结合能够全面描述手势动作特征。在众多嵌入式平台中, STM32 系列单片机以其高性能、低功耗、丰富的外设接口和较高的性价比, 在可穿戴设备领域得到广泛应用。本研究充分利用 STM32 的多通道采集与实时处理能力, 结合弯曲传感器与陀螺仪的数据融合策略, 构建了一套低成本、高效率的手语识别与翻译系统。该系统不仅能准确识别多种常见手语, 还能借助蓝牙技术将识别结果实时传输至手机或电脑, 转化为文

字或语音输出,有效提升听障人群的沟通效率。综上所述,本研究从实际需求出发,兼顾技术可行性与社会价值,探索了多传感器融合在手语识别中的应用潜力,为促进信息无障碍和社会融合提供了新的技术路径。

2 总体设计与硬件结构

本研究设计的手语识别与翻译系统以可穿戴手套为主要载体,通过在手指及手背等关键位置布置传感器来实时采集手部动作数据。系统的核心目标是实现手语动作到文字信息的快速、准确转换。研究思路基于多传感器融合技术,将手指弯曲程度与空间姿态数据相结合,经单片机处理后输出识别结果,以保证识别的稳定性与实时性。系统的总体框架包括四个模块:信号采集、信号处理、数据传输以及信息输出。信号采集模块负责获取手部动作的原始数据;信号处理模块以 STM32 单片机为核心,对采集信号进行数字化和滤波;数据传输模块通过蓝牙实现识别结果的无线发送;信息输出模块则在移动端以文字或语音的形式呈现识别内容。各模块之间通过电气连接与程序逻辑形成数据流通,保证系统工作过程的连贯性。在硬件构成上,系统采用五个弯曲传感器与一个三轴陀螺仪模块(MPU6050)。五个弯曲传感器分别安装于手套的五根手指背部,用于检测手指弯曲角度。传感器的阻值会随弯曲程度变化而改变,单片机通过 ADC 通道读取电压信号并转换为相应角度值。MPU6050 模块集成三轴陀螺仪与三轴加速度计,可实时测量手部角速度与加速度,从而确定手势的旋转和倾斜姿态。弯曲传感器与陀螺仪数据融合后,能更全面地描述手势特征,为后续识别提供高质量输入。系统的核心控制器采用 STM32F103C8T6 单片机。该芯片基于 ARM Cortex-M3 内核,主频 72MHz,具备丰富的 I/O 接口与较强的处理能力,支持多通道 ADC 采样,适用于高实时性要求的任务。同时,其功耗低、稳定性高、编程灵活,可在可穿戴设备中长期稳定运行。为提高弯曲传感器输出的稳定性,电路中加入电压分压结构和 RC 滤波器,以减小噪声干扰和信号抖动。为保证安全性与可靠性,在传感器与单片机接口处增加限流电阻和保护电容。系统采用锂电池供电,通过 DC-DC 稳压模块输出 5V 与 3.3V 两路电压,分别供给传感器与主控芯片。电路板尺寸经过优化,可嵌入常规手套内部,确保佩戴舒适。数据传输部分采用 HC-05 蓝牙模块,通过串口与 STM32 通信。该模块功耗低、速率高,可稳定传输识别结果至移动端。为方便用户,移动端设计了简洁的界面,可即时显示识别文字,并支持语音播报,增强信息反馈效果,方便听障者在不同

环境下使用。

在系统构建过程中,除硬件电路外,佩戴舒适度与安全性也为重点考虑因素。传感器与导线均采用柔性排线连接,外部包裹绝缘层,以提升手套柔软性与安全性。系统总重量控制在 100 克以内,不影响手部自然动作,电池续航约 6 小时,满足日常使用。为提高数据精度,传感器安装前需多次调试。每根弯曲传感器在固定前进行标定,记录完全伸直与完全弯曲时的电阻范围。标定数据存储在单片机 Flash 中,程序运行时自动调用。陀螺仪模块通过 I2C 总线与主控通信,系统设有零偏校正功能,可在启动时自动校准姿态,减少累计误差。

通过上述设计,系统构成了一个结构紧凑、响应迅速、精度较高的手语识别硬件平台。多传感器融合显著提升了系统对复杂手势的识别能力,STM32 的实时处理能力保证了数据的高效响应,为后续算法实现与系统优化提供了稳定的基础。

3 数据采集与算法

在硬件系统搭建完成后,核心任务是将传感器输出的信号转化为可识别的手语特征数据。数据采集与算法实现直接影响识别准确率和系统稳定性。本系统以 STM32 单片机为主控单元,通过 ADC 和 I2C 接口分别采集弯曲传感器和陀螺仪数据,再经过滤波、归一化与特征提取,最后采用 KNN 算法进行手势分类。

3.1 数据采集与预处理

五个弯曲传感器输出的模拟电压与手指弯曲角度对应。为减少噪声干扰,每个通道经过 RC 滤波。STM32 的 ADC 模块以 10 位精度采样,将电压转换为 0 至 1023 的数字量。采样频率设为 50Hz,可捕捉手动作的动态变化。同时,MPU6050 模块通过 I2C 总线传输三轴加速度与三轴角速度数据,频率同为 50Hz,保证时间同步。由于传感器信号存在波动,系统采用滑动平均滤波,每次取连续 5 个采样点的平均值以平滑数据。实验表明,该方法在保持实时性的同时能有效减少噪声。系统在启动时自动校准,当手势静止时记录各通道基准值,在运行中动态修正,消除不同手型带来的误差。

3.2 特征提取与数据归一化

预处理后,系统从信号中提取关键特征。弯曲传感器反映手指弯曲幅度,陀螺仪提供角速度与加速度,表示手势方向和姿态。综合这些数据形成十维特征向量: $F = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, a_x, a_y, a_z, g_x, g_y]$ 。其中, f_1 至 f_5 表示五指弯曲程度, a_x 、 a_y 、 a_z 为加速度分量, g_x 、 g_y 为角速度

分量。不同传感器输出范围不同，若直接输入算法，会造成维度不均衡。为此系统采用最小 - 最大归一化，将各项数据映射到 0 至 1 区间，提高特征可比性。归一化过程由 STM32 实时完成，保证系统处理的连续性。

3.3 KNN 分类算法设计

算法选择上，考虑系统资源限制与实现复杂度，本研究采用 K 最近邻算法 (K-Nearest Neighbor, KNN)。该算法结构简单、实现方便，适合嵌入式设备。其基本原理为：当输入新手势特征时，系统计算其与训练样本的欧氏距离，选取最近的 K 个样本，根据多数原则确定类别。系统通过实验建立基础手势样本库，每种手势录入约 100 组数据，取平均值作为训练样本并存储于单片机 Flash 中。识别时，系统计算当前特征向量与样本集各样本的欧氏距离：

$$d = \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2}$$

其中 x_i 为当前特征， y_i 为样本特征。

实验表明，当 K 取 3 时，识别稳定且计算量适中，可在 STM32 上实现毫秒级响应。

3.4 算法优化与系统稳定性

为提高识别准确率，系统在 KNN 算法前增加特征平滑处理。连续三帧数据分类一致时才确认输出，不一致则重新计算，以减少瞬时误判。当检测到快速动作或大幅旋转时，系统暂停识别，待姿态稳定后继续判断，从而降低误识别概率。系统共识别 15 种常用手势，如“你好”“谢谢”“再见”“我”“你”等。每种手势录制 10 次样本，5 次用于训练，5 次用于测试。实验结果显示，系统平均识别率达 91.3%，弯曲传感器重复性误差约 $\pm 3\%$ ，陀螺仪姿态误差小于 2° ，能够满足日常交流需求。

3.5 系统实时性与响应分析

系统在正常工作状态下，从采集到输出约需 200 毫秒，延迟低于用户感知阈值。数据计算占用 CPU 时间约 40%，仍具优化空间。蓝牙模块传输速率为 115200bps，可实现即时数据发送。算法程序占用单片机 Flash 空间约 30%，为后续功能扩展预留余量。总体上，系统在保持硬件简洁和低成本的前提下，实现了稳定可靠的手势识别。弯曲传感器与陀螺仪数据融合提高了区分度，KNN 算法在速度与准确率间取得平衡，使系统兼具工程实用性与研究价值。

4 实验结果分析

为了验证系统在手势识别中的准确性与稳定性，本研究进行了多轮实验测试。实验主要从三个方面展开：验证传感器采集数据的可靠性，评估 KNN 算法在不同手势样本下的识别效果，分析系统在多用户和不同使用条件下的

性能与误差来源。

4.1 实验环境与设备配置

实验在实验室环境中进行，室温约 25°C ，光照均匀，无强电磁干扰。实验系统为设计完成的手势识别手套，包含五个弯曲传感器和一个 MPU6050 陀螺仪模块，主控芯片为 STM32F103C8T6。系统由 3.7V 锂电池供电，蓝牙模块 HC-05 用于数据无线传输。移动端使用自编写的串口助手程序接收并显示识别结果。为增强实验的代表性，共有三名志愿者参与测试，两人具备手语基础，一人不熟悉手语。志愿者佩戴手套后，依次完成预设的十五种常用手势动作，包括“你好”“谢谢”“再见”“对不起”“早上好”“我”“你”“他”“我们”“没问题”“帮助”“吃饭”“喝水”“再见”等。每个手势重复录制十次，系统自动保存采样数据用于分析。

4.2 数据记录与结果统计

实验过程中，系统实时采集弯曲传感器与陀螺仪信号，经滤波、特征提取与归一化后输入 KNN 算法进行分类识别。实验结果表明，系统整体识别性能稳定。表 1 列出了部分手势识别结果的统计数据（为实验平均值）：

手势动作	平均准确率(%)	平均响应时间(ms)
你好	95.6	210
谢谢	94.8	215
再见	92.1	230
请	89.3	240
对不起	87.6	250

从结果可以看出，大多数手势识别准确率在 90% 左右，动作幅度较大、形态明显的手势（如“你好”“再见”“我”）识别率较高，超过 95%。而动作细微或姿态变化复杂的手势（如“喝水”“对不起”）识别率略低，说明系统对大幅度动作更敏感，在精细动作识别上仍有提升空间。

4.3 多用户识别性能分析

为验证系统的普适性，对不同用户的数据进行了比较。实验发现，个体手型差异会影响识别准确率。对未进行标定的新用户，初始识别率约 85%；经系统自动校准后，识别率提升至 91% 左右。这表明自适应校准功能可有效减小个体差异带来的误差。佩戴松紧程度也对信号稳定性有影响，若传感器未贴合，弯曲值采集范围会变窄，特征分布受限。针对这一问题，系统增加了自检程序，当检测到异常数据时提示用户重新校准，以保持识别精度。

4.4 动态响应与实时性能

系统的动态性能是评价其实用价值的重要指标。实验

数据显示,从手势完成到文字输出的平均延迟约 0.18 秒,其中采样与滤波约占 60 毫秒,KNN 分类约 40 毫秒,数据传输与显示约 80 毫秒。整体延迟低,用户几乎无明显感知。系统在连续识别模式下可保持每秒五次的更新速率,足以满足日常交流需求。为验证稳定性,进行了长时间运行测试。系统连续工作两小时后,信号漂移低于 3%,蓝牙连接稳定不断线。电池续航约六小时,满足短时日常使用。

4.5 误差来源与改进方向

多次实验对比发现,误差主要来自三方面。第一,弯曲传感器的非线性特性。阻值变化在不同角度下不完全线性,导致中间角度识别精度下降。后续可通过多点标定与插值算法改进线性度。第二,手势动作速度差异。部分用户动作过快会造成采样延迟,使姿态与弯曲数据不同步。可通过提升采样频率或增加时间同步机制优化。第三,KNN 算法依赖样本分布,当样本数量有限或不均衡时,分类准确度会下降。未来可采用加权 KNN 或扩大训练样本改进性能。总体来看,本系统在结构简洁、成本较低条件下,实现了较高的识别率与良好的实时表现。实验验证了基于弯曲传感器与陀螺仪的多传感器融合方法的可行性。与视觉识别方式相比,本系统不受光照与背景干扰,设备体积更小,更适合听障人群日常佩戴。

5 结语

本研究围绕基于弯曲传感器与陀螺仪融合的手语识别与文字翻译系统展开,完成了从系统设计、硬件搭建、数据采集到算法实现与实验验证的完整过程。研究结合嵌入式控制技术与多传感器融合方法,构建了低成本、高实时性和高准确度的手语识别原型系统,为听障群体的语言交流提供了新的技术途径。研究表明,该系统在结构紧凑、响应迅速、识别率高等方面具有明显优势,能够满足日常交流场景下的使用需求。系统设计的合理性在实验中得到了充分验证。弯曲传感器与陀螺仪的融合使设备既能

检测手指弯曲形态,又能感知手部旋转与姿态变化,从而实现更全面的手势识别。STM32 单片机在保证低功耗的同时具备较强的实时处理能力,使得系统能够在轻量化条件下保持稳定运行。实验结果进一步证明,该方案在准确性与实用性上具有较好平衡,具备推广潜力。在未来研究中,可从多个方向继续改进。首先,可通过改进传感器材料与结构提升灵敏度与响应速度,增强数据精度与重复性。其次,可优化算法模型,引入轻量化神经网络或加权 KNN 算法,以提升复杂手势识别的鲁棒性。再次,可扩展系统功能,实现双手动作识别与动态语义识别,从而提升表达范围与自然性。最后,可将系统与移动终端、物联网平台及语音合成技术相结合,构建完整的智能交互生态,使手语识别设备具备更广泛的应用场景。

总体来看,本研究不仅在技术上验证了多传感器融合手语识别系统的可行性,也在社会层面为听障人群的沟通提供了新路径。随着传感技术、算法和嵌入式硬件的不断发展,未来的手语识别系统有望实现更高的精度与智能化水平,为无障碍交流和信息平等化提供更有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 王建华, 李晓东. 基于弯曲传感器的手势识别系统研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(6): 54-59.
- [2] 刘洋, 陈鹏. 多传感器融合的手语识别算法研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(4): 482-489.
- [3] Zhang H, Liu S. A wearable sign language recognition system using flexible sensors[J]. Sensors, 2021, 21(12): 3987.
- [4] 周志华. 机器学习[M]. 清华大学出版社, 2022.
- [5] 李强, 张磊. 基于 STM32 的手语识别系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(5): 27-32.

作者简介: 茆佳诚(2005.11-), 男, 汉族, 江苏扬州, 本科。