

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210549

# 基于 Arduino 和 STM32 的主动式手部训练系统\*

董千恒<sup>1</sup> 张秀再<sup>1,2</sup> 许芝也<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

**摘要:** 手部功能障碍患者在家自行练习康复动作时,由于缺乏科学的指导,训练步骤混乱,动作的精度与强度难以得到保证,从而影响了康复效果。本文设计了一套基于 Arduino 和 STM32 的主动式手部训练系统,系统分为数据手套、动作指导手掌和上位机三大部分,数据手套通过传感器获取手指和手腕的转动角数据并进行处理,然后将数据无线传输给动作指导手掌,动作指导手掌中的控制器 STM32 将接收数据与标准动作数据库进行比对,分析动作标准度,然后通过语音指导患者做出调整。STM32 根据运动数据驱动六个数字舵机带动仿生手掌运动,从而模仿人手动作,系统使用 LD3320 识别患者命令,进行人机交互。系统通过上位机将标准动作数据库下载至 STM32 外扩闪存中,用于患者手部动作数据比对。实验结果表明,该系统能够有效指导患者完成整套康复训练动作,数据读取准确,指导精准可靠,交互性强,可以帮助我国约 600 万脑卒中手部运动功能障碍患者进行康复训练,具有很强的应用价值。

**关键词:** 手指康复训练;数据手套;人机交互;Arduino;STM32

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Active hand training system based on Arduino and STM32

Dong Qianheng<sup>1</sup> Zhang Xiuzai<sup>1,2</sup> Xu Zhiye<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Province Atmospheric Environment and Equipment Technology Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** When patients with hand dysfunction practice rehabilitation movements by themselves at home, the training steps are confusing due to the lack of scientific guidance, and the precision and intensity of the movements are difficult to be guaranteed, thus affecting the rehabilitation effect. In this paper, an active hand training system based on Arduino and STM32 is designed. The system is divided into three major parts: data glove, movement guiding palm and upper computer, The data glove obtains and processes the rotation angle data of the fingers and wrist through sensors, and then transmits the data wirelessly to the movement guidance palm, and the controller STM32 in the movement guidance palm compares the received data with the standard movement database, analyzes the movement standard, and then instructs the patient to make adjustments by voice. STM32 drives six digital servos to drive the movement of the bionic palm according to the movement data, thus imitating the human movement. The system uses the LD3320 to recognize patient commands and perform human-computer interaction. The system downloads the standard movement database to the STM32 external flash memory through the upper computer, which is used to compare the patient's hand movement data. The experimental results show that the system can effectively guide patients to complete the whole set of rehabilitation training movements with accurate data reading, precise and reliable guidance, and strong interactivity. It can help about 6 million stroke patients with hand motor dysfunction in China for rehabilitation training, which has strong application value.

**Keywords:** finger rehabilitation training; data glove; human-computer interaction; Arduino; STM32

## 0 引言

随着我国经济的发展以及生活和医疗水平的提高,公

民的平均寿命也在不断延长,“人口老龄化”问题也随之而来。而脑卒中常发于中老年群体,根据部分地区调查显示,95%以上的脑卒中患者是 50 岁以上人群,大约 85% 的患

收稿日期:2022-07-02

\* 基金项目:国家自然科学基金青年基金(11504176, 61601230)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20141004)项目资助

者是 60 岁以上人群<sup>[1]</sup>。随着老龄化过程的加快,脑卒中的发病率也在不断增长,我国脑卒中患者总人数已达 1 100 万人。脑卒中一旦发生,病人的生理机能与生活质量会大幅度下降,病人家属也将承受高昂的治疗费用和沉重的心理压力。在幸存者中,大多数人会有语言障碍、运动障碍、认知缺陷等后遗症,手部损伤也是脑卒中患者后遗症之一<sup>[2]</sup>,数据显示超过 60% 的脑卒中患者在进入慢性期后仍然存在上肢或手功能的障碍。

医学研究表明,长期规律地运动康复训练可帮助患者恢复手指运动功能,手部运动技能的恢复,可以帮助病人提高生活质量,减轻家庭负担。传统的康复训练方式是医生与患者一对一的指导训练,医生借助工具或徒手帮助患者牵拉手指,使得手指逐渐恢复运动机能,当患者恢复一定的技能后,开始自主做重复的牵拉运动。自主训练时,由于缺少训练师专业地实时指导,动作的精度与强度很难得到保证,训练缺乏科学性,动作步骤混乱模糊,从而可能影响康复进程,甚至可能造成二次损伤。

为了有效辅助患者进行康复训练,设计了一套基于 Arduino 和 STM32 的主动式手部训练系统,测试表明该训练系统可以提供标准的动作演示,有效指导患者科学地完成整套训练动作,并通过分析患者的手部运动动作,提示运动动作是否标准,这种智能化交互方式可以提高训练的有效性和趣味性。

## 1 系统结构与原理

### 1.1 系统结构设计

本系统包含 STM32 控制板、Arduino 控制板、加速度计、电位器、蓝牙模块、机械手套、语音识别模块、仿生手臂、数字舵机、MP3 模块、存储器模块等。系统分为数据手套、动作指导手掌和上位机三大部分,数据手套负责收集和分析手部运动数据,动作指导手掌负责处理数据,语音识别播报,动作演示等功能,上位机可更新动作组,图 1 为系统设计框图。

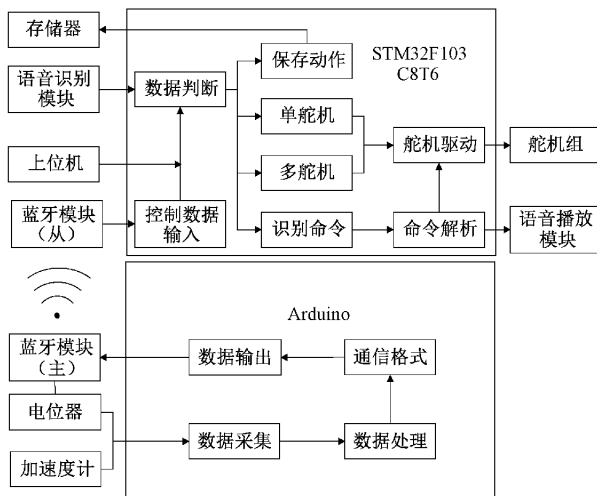


图 1 系统框图

### 1.2 手套结构设计

手套与手指运动相关的机械结构主要包括基座、旋钮、仿掌骨、仿指骨、连杆等,图 2 为手套结构设计示意图。机械运动结构的连接依据手指关节的运动规律,关节处采用铰链结构,基座为印刷电路板,钮帽连接电位器。单根手指的旋钮、仿掌骨、仿指骨、连杆构成 4 个自由度。当佩戴时,使用固定带固定手腕、手掌和手指处。

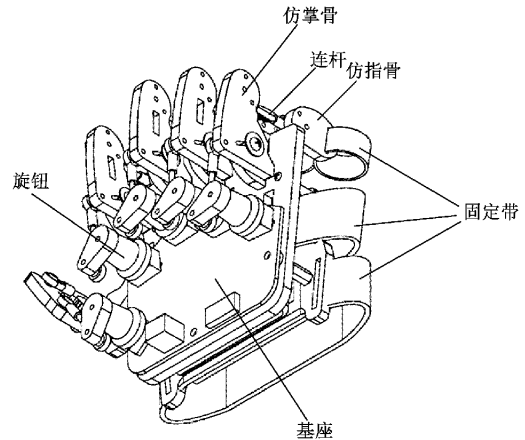


图 2 手套设计示意图

当手指运动时,带动连杆仿指骨仿掌骨与旋钮运动,机械结构与手指的运动简化为如图 3、4 所示的运动模型。图 3 中,掌骨-旋钮连接件的长度为  $r$ ,与旋钮的水平夹角为  $\theta$ ,设最小夹角为  $\theta_0$ 。图 4 中,  $A$ 、 $B$ 、 $G$  三点分别位于关节 2、关节 3、关节 1 处,  $AG$ 、 $AB$ 、 $BC$  长度分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,  $C$  为连杆与手指指骨连接处。  $E$  点为  $\theta$  最小时,  $G$  点所在位置。  $O$ 、 $D$  点分别位于  $E$  点垂直于掌骨交点处与掌骨近指骨连接处,  $CD$ 、 $OD$  长度分别为  $d$ 、 $e$ 。  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$  分别为手指指骨与垂直方向夹角,仿掌骨-仿指骨关节弯曲角、仿指骨-连杆关节弯曲角,则向量  $(\alpha, \gamma, \beta, \theta)$  代表了手指与机械结构的空状态,所有的向量组成空间向量集  $G$ ,机械结构的设计应满足包含所有手指全部运动状态向量集<sup>[3]</sup>。

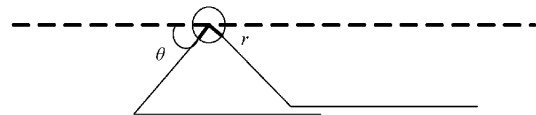


图 3 手指与手套机械结构运动简化模型 1

设初始状态  $\theta = \theta_0$ ,当手指弯曲时,带动机械结构运动,改变  $\theta$  值,仿掌骨向前运动  $l$  距离,  $l$  由  $\theta$  唯一确定,表示为:

$$l = \begin{cases} r \cos \theta_0 - r \cos \theta, & \theta_0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \\ r \cos \theta_0 - r \cos \theta, & \frac{\pi}{2} \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (1)$$

设  $E(0, h_1)$ , 则  $A$  点  $(x_A, y_A)$  由式(2)确定,表示为:

$$\begin{cases} x_A = a + l \\ y_A = h_1 \end{cases} \quad (2)$$

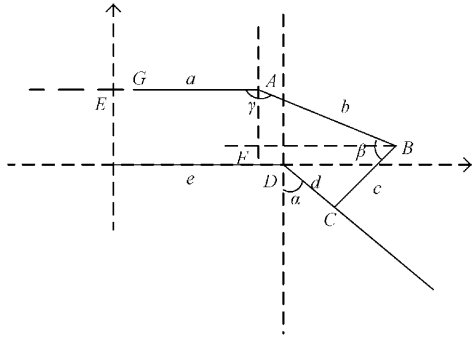


图 4 手指与手套机械结构运动简化模型 2

$B(x_B, y_B), F(x_F, y_F)$  点位置由  $\gamma$  唯一确定, 表示为:

$$\begin{cases} x_B = x_A - b \cos \gamma \\ y_B = y_A - b \sin \gamma \\ x_F = x_A \\ y_F = y_B \end{cases} \quad (3)$$

由勾股定理得  $AB^2 = AF^2 + BF^2$ , 解式(4)可得  $\gamma(\theta)$  为:

$$(y_A - y_F)^2 + (x_B - x_F)^2 = b^2 \quad (4)$$

C 点坐标可由  $\alpha$  唯一确定, 表示为:

$$\begin{cases} x_C = e + d \sin \alpha \\ y_C = -d \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

由余弦定理得到式(6), 解方程可得  $\beta(\alpha, \theta)$  值

$$2bc \cos \beta = b^2 + c^2 - [(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_B)^2] \quad (6)$$

综上所述, 当  $\theta, \alpha$  确定, 机械结构运动符合手指运动条件时, 可求得  $\gamma, \beta$  可行解, 由此获得空间向量集  $G$ 。  $\theta$  为旋钮转动角, 转动范围越大, 空间状态集越大。设计机械结构时, 空间向量集应尽可能包含手指全部运动状态。对于不同的手指长度, 选定构建尺寸组, 通过计算获得不同尺寸下的空间向量集  $G$ , 找到能够包含所有手指屈伸状态的构件尺寸组, 由此确定结构尺寸, 设计时还应保证设备的可穿戴性、运动合理性以及美观性。

## 2 硬件设计

### 2.1 微控制器

手套部分使用 Arduino 作为控制器, Arduino 是一块基于 ATmega328 的微控制器板, 芯片工作电压为 5 V, 晶振频率为 16 MHz<sup>[4]</sup>。系统采用 32 位的 ARM Cortex-M3 内核 STM32F103C8T6 作为仿生手掌部分的主控制器, 系统工作电压为 3.3 V<sup>[5]</sup>。

### 2.2 数据采集模块

手套部分使用电位器和 ADXL345 加速度计获取手指弯曲度与腕部转动数据, 通过 Arduino 采集每根手指上的电位数据, 获取加速度计数据, 以此来分析手部运动数据。图 5 为数据采集模块原理图。Arduino PC0、PC1、PC2、ADC6、ADC7 引脚接电位器, 读取电位器电压, 手指运动时通过机械结构带动电位器旋钮转动, 从而改变电位器电位。SCL、SDA 引脚连接模块 SCL、SDA 引脚, 读取 ADXL345

传输的  $x, y, z$  轴加速度数据<sup>[6]</sup>, 手腕转动时, ADXL345 测量的  $x, y, z$  轴加速度分量会发生变化, 系统根据加速度分量计算出手腕的转动角。

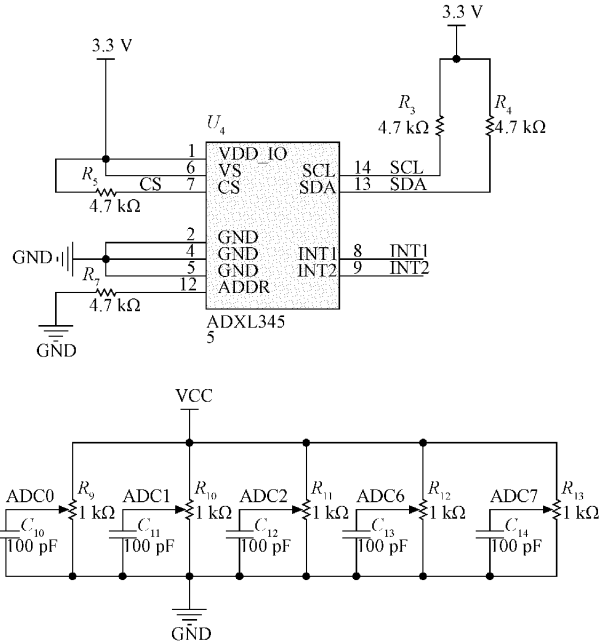


图 5 数据采集模块

### 2.3 蓝牙模块

系统使用 HC-05 蓝牙模块实现手套与手掌之间的通信, HC-05 模块是一款高性能主从一体蓝牙串口模块<sup>[7]</sup>。模块的 RXD、TXD 引脚连接 Arduino 的 TXD、RXD(PD1、PD0) 串口引脚, 另一模块的 RXD、TXD 引脚连接 STM32 的 RX0、TX0 串口引脚, 接收 Arduino 传送数据。

### 2.4 语音识别模块

系统使用 LDV7 语音识别模块实现语音控制手掌运动, LDV7 模块主要由语音识别芯片 LD3320 和 STC11L08XE 微控制器组成<sup>[8]</sup>。LD3320 是一款基于通用语音识别(SI-ASR)技术的语音控制/语音识别芯片<sup>[9]</sup>。当使用者说出动作名称时, 手掌会做出相应动作演示, 使用者也可通过语音控制开启训练模式。模块中集成一块 STC11L08XE 控制芯片控制语音芯片, 处理输出数据, 模块中 STC11L08XE 使用并行通信方式与 LD3320 通信。STM32 的 PA9、PA10 引脚连接模块 RX、TX 引脚, 接收命令字符串<sup>[10]</sup>, STM32 对字符串进行解析执行相应动作, LDV7 模块可根据上位机指令更改关键词列表<sup>[11]</sup>。图 6 为语音识别模块结构连接图。

### 2.5 语音播放模块

为方便指导患者训练动作, 系统使用 DY-SV5W 模块进行语音播放训练指令, 患者可根据语音指令提示调整动作。DY-SV5W 模块结构图如图 7 所示, STM32 的 TXD1、RXD1 与模块 RXD、TXD 引脚连接, 进行通信。将提示音频以 MP3 格式存入 TF 卡中, STM32 通过发送串口指令

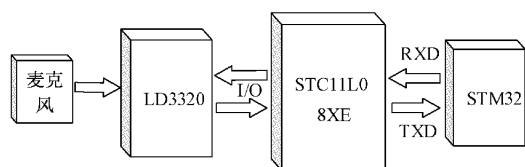


图 6 语音识别模块结构连接图

调用音频控制播放<sup>[12]</sup>。

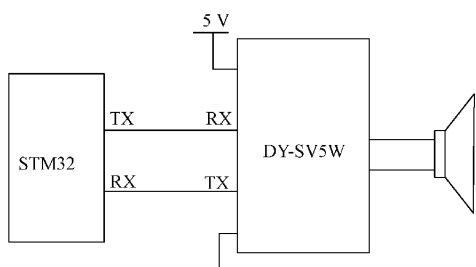


图 7 DY-SV5W 模块结构图

### 3 软件设计

系统程序设计使用模块化设计思想,编写好对应模块功能后,在主程序中调用相应模块即可。

#### 3.1 主程序

主程序主要完成系统初始化、功能模块的调用、逻辑控制等工作。系统上电后,各部分完成初始化,初次佩戴使用时,可按下对应按键记录患者手指活动范围校准数据,便于系统分析不同患者的运动数据。校准完毕后,开始采集手部运动数据,并进行滤波、计算转换等分析,将分析后的数据按照设定的通信格式通过蓝牙传输。STM32 收到数据后,根据模式数据判断进入模式,根据运动数据判断动作标准度,提示下一步动作。进入命令模式,可分析语音或上位机指令,进行相应动作,进入单舵机、多舵机模式,可进行动作演示、舵机调试,进入保存动作模式,可更新动作库。主程序流程如图 8 所示。

#### 3.2 采集手部数据程序设计

系统上电后,按下校准按键,患者做出握拳动作,Arduino 读取电位器电压记录电压最小值  $V_{min}$ ,然后做出张手动作,Arduino 读取电位器电压记录电压最大值  $V_{max}$ ,根据电压变化范围和式(7)计算比例系数  $k$ ,表达式为:

$$k = \frac{2000}{V_{max} - V_{min}} \times k_d \quad (7)$$

其中,  $k_d$  为调整系数,实际运行时当电位器电位达到最大或最小电位,舵机可能无法转动至最大转动角或最小转动角,此时可适当将  $k_d$  变大,初始情况下,  $k_d$  默认值为 1,即电位达到最大时,舵机转动至最大转动角或最小转动角。写入加速度计校准值后,完成手套校准工作。

之后 Arduino 继续采集 ADXL345 加速度计数据和电位器电压,进行卡尔曼滤波<sup>[13]</sup>和校准后,根据式(8)计算倾斜角<sup>[14]</sup>。

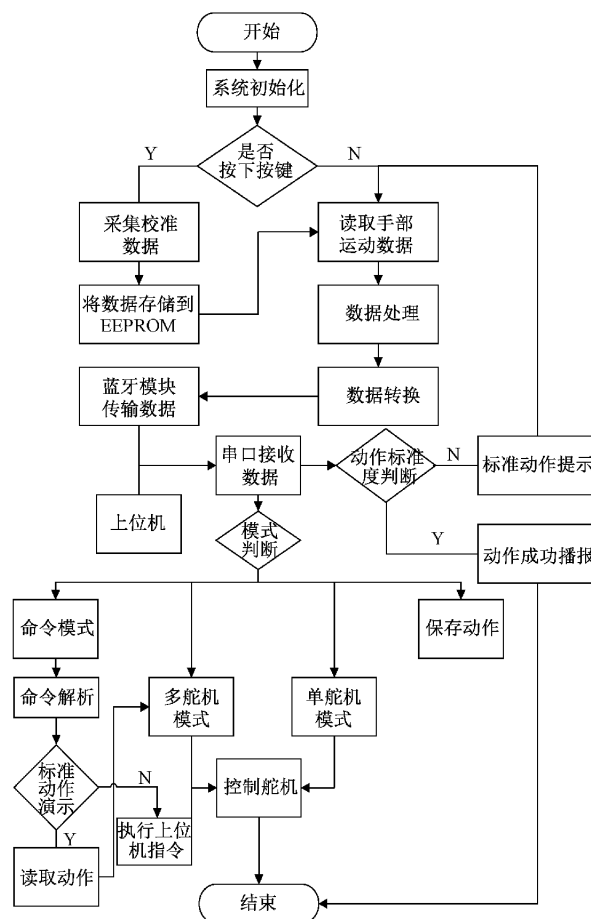


图 8 主程序流程

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arctan \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \\ \beta_1 = \arctan \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \\ \gamma_1 = \arctan \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  为加速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的加速度分量。

再根据获得的倾斜角以及电位数据来计算脉冲宽度调制波(pulse width modulation waves, PWM)参数。手指部分 PWM 波参数计算式如式(9)所示。

$$VAL_{PWM} = 1500 + k(V - V_{mid}) \quad (9)$$

其中,  $VAL_{PWM}$  为 PWM 参数,  $k$  为比例系数由式(7)计算得出,  $V$  为采集电压值,  $V_{mid}$  为电位器电压变换范围中值。手部数据采集算法流程如图 9 所示。

#### 3.3 语音播放控制程序设计

系统使用语音播放模块指导患者完成动作,语音控制的程序流程如图 10 所示。STM32 获得每根手指的运动数据后,先从大拇指判断是否达标,若动作不达标,控制语音模块播放“大拇指向内弯曲”或“大拇指向外伸展”等提示,指导患者进行下一步动作,患者根据提示调整动作后,系统

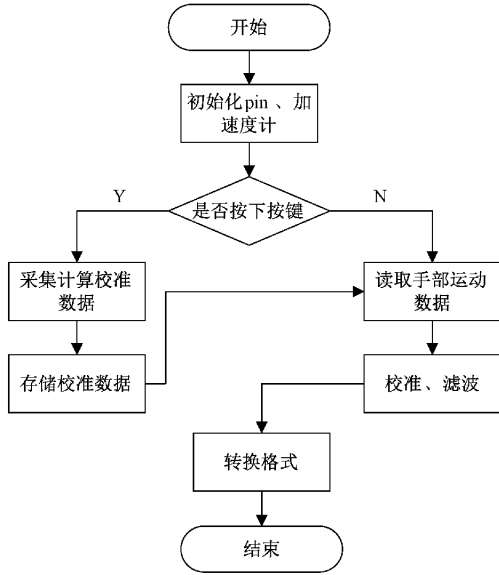


图 9 手部数据采集算法流程

再次获取运动数据进行判断,直至大拇指运动达标。若拇指运动达标,则指导食指运动,指导步骤同拇指,当所有手指运动都达标时,控制语音播放模块提示“动作完成进行下一个动作”。

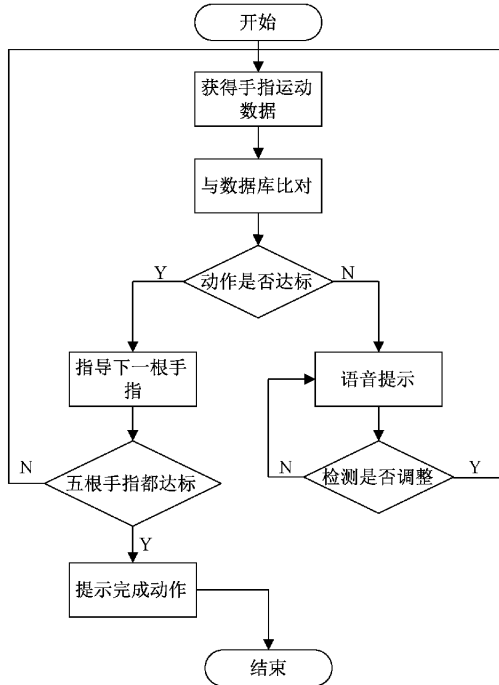


图 10 语音播报程序流程

### 3.4 上位机设计

系统使用上位机更新动作库,上位机程序流程如图 11 所示。首先使用 QT5 的 QSerialPort 类、QSerialPortInfo 类编写串口搜寻打开槽函数,然后设计动作参数槽,用于写入动作参数,动作参数槽函数 action\_para() 会将动作参数整合为固定字符串格式<sup>[15]</sup>,然后点击下载控件,动作字符串将会

被发送,下位机接收到动作组字符串后,会返回成功下载信息,如上位机接收到“success”,则结束发送,若接收到错误提示,则重新发送字符串。

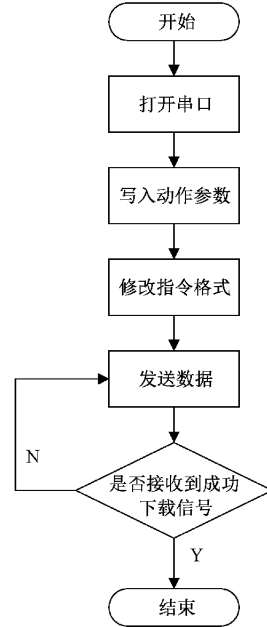


图 11 上位机程序流程

## 4 实验与结果分析

### 4.1 手套手掌运动性能实验

手套作为数据采集分析的核心部件,应该保证包括手指运动所有空间向量集,且运动流畅。使用者佩戴好手套后握紧拳头然后逐渐伸展,在运动的过程中,读取上位机上每根手指的运动参数,以食指为例,食指手指运动角(以掌背所在平面为基准面,近指骨与基准面的夹角)与手套运动参数 fig\_val 关系如图 12 所示。由图 12 可得通过计算得出的 fig\_val 值与手指转动角度呈负相关,且包括手指所有运动角,由于手指转动角的连续性、电位器变化时电位变化与转动角的线性关系以及计算手套运动参数时采用式(7)得出的比例系数,使得手指转动角与 fig\_val 呈线性关系。

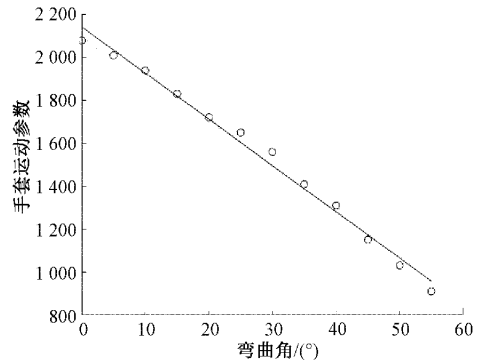


图 12 手指运动角与手套运动参数关系

手掌是系统与使用者交互的核心组件,手掌运动应实

时跟踪使用者动作,使用者佩戴好手套后,做出日常动作,实验通过直观地观察手掌的运动来验证使用手套与仿生手掌交互的合理性与正确性。图 13 是手掌跟随手部运动示意图。

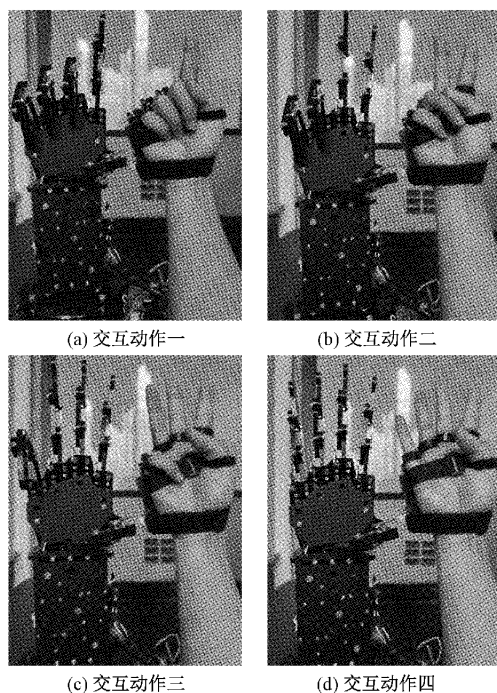
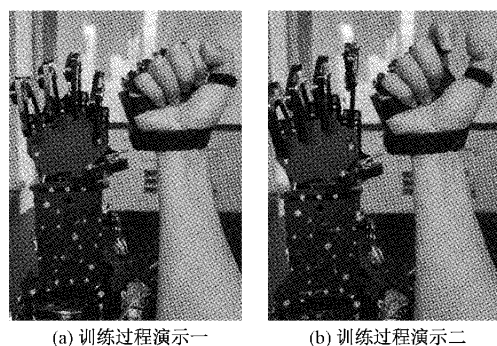


图 13 手掌跟随手部运动示意图

实验表明,仿生手掌可以实时地跟随手部的运动,多根手指同时运动时,仿生手掌亦可快速响应,做出相应动作,仿生手掌与人手可以良好地进行交互。

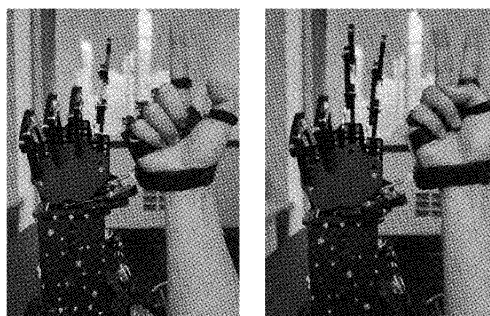
#### 4.2 训练模式指导准确性与语音识别成功率实验

根据手部训练系统的软硬件和机器人辅助疗法理论,本文设计了主动式训练模式,需要通过实验验证其训练效果和可靠性。使用者进入训练模式后,系统会根据现有的手部数据分析出下一步指导动作,通过语音提示使用者运动,实验通过听从语音提示来进行运动,观察是否可以标准有序地完成一套训练动作。图 14 为训练示意图,使用者根据提示做出“二”这一动作。结束训练后,使用者说出“1”“2”等语音,观察手掌是否做出相应动作。



(a) 训练过程演示一

(b) 训练过程演示二



(c) 训练过程演示三

(d) 训练过程演示四

图 14 手部训练示意图

实验表明,使用者根据系统的语音提示可以有序标准地完成一套训练动作,语音识别成功率在 90% 以上。

## 5 结 论

本文设计了一套主动式手部训练系统,系统采用数据手套和仿生手掌相结合的方式,数据手套可快速准确地采集手部运动数据,具有示教和跟随运动功能的仿生手掌通过语音控制训练过程,有效地指导患者完成一整套训练动作,并且可以实时跟随手部运动,语音识别成功率高于 90%。此外,系统通过上位机更改动作库参数或下载新的动作库参数,从而改变手部训练动作,增强了系统灵活性。通过实验检验,该系统可以有效地帮助手部受伤患者进行康复训练。

## 参考文献

- [1] 刘爱华. 脑中风现状与冬季预防[J]. 家庭医学, 2021(2): 16-17.
- [2] 王婷婷, 魏清川, 马锡超, 等. 脑卒中运动功能障碍的规范化三级康复策略探讨[J]. 华西医学, 2022, 37(5): 749-756.
- [3] 郑杨, 陈垒, 王刚, 等. 欠驱动式手指康复训练装置的结构优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 151-156.
- [4] 蔡睿妍. Arduino 的原理及应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(16): 155-157.
- [5] 聂茹, 陆兆基. 基于 STM32F103C8T6 的智能俯卧撑训练器设计[J]. 信息技术, 2019, 43(6): 44-47, 51.
- [6] 宣慧, 孙佳昊, 程实, 等. 基于 I<sup>2</sup>C 总线实验设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(1): 52-55.
- [7] 吴赓. 蓝牙技术在单片机控制中的应用[J]. 机电信息, 2021(26): 60-61, 64.
- [8] 金鑫, 田犇, 阙大顺. 基于 LD3320 的语音控制系统设计实现[J]. 电脑与信息技术, 2011, 19(6): 22-25.
- [9] 郑红娜. 基于语音识别的智慧分类垃圾桶研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(6): 68-69.
- [10] 吴云龙, 程武山. 基于 STM32 的语音识别机械手智能系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(1):

- 37-41.
- [11] 易诗,林凡强,周姝颖. 基于 STM32 的语音控制机械手[J]. 电子器件,2017,40(1):162-165.
- [12] 杨照坤,黄高祥,郑秀宏. 一种语音播报系统的设计[J]. 机电工程技术,2021,50(4):203-205.
- [13] 郭丽,刘磊,朱宏康. 优化自适应卡尔曼滤波跟踪方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2019,14(9):929-934.
- [14] 苏彦平,公茂法,安彬,等. 基于传感器 ADXL345 倾角测量仪的设计(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2014,5(2):19-22.
- [15] 谢学刚,董桂菊,于猛,等. 基于 Qt5.0 的机器人姿态检测与控制系统的的设计[J]. 农机化研究,2016,38(4):90-93,98.

#### 作者简介

**董千恒**,本科,主要研究方向为电子测量与控制技术、嵌入式开发。

E-mail:1273132290@qq.com

**张秀再**(通信作者),副教授/博士,主要研究方向为量子通信技术、气象通信技术及气象信息处理、机器学习、电子测量与控制技术。

E-mail:zxzhering@163.com