

基于ESP32的脚踝康复机器人的控制系统设计

吴海帆, 李树东, 朱广亚

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 针对脚踝康复机器人通过传统上位机控制带来的不便性和较差的交互体验, 设计一种基于单片机ESP32和微信小程序的控制系统。微信小程序可以与ESP32的蓝牙模块通过通用属性配置文件(generic attribute profile, GATT)协议进行蓝牙通信, ESP32根据接收到的不同指令控制步进电机的运行, 实现通过手机调节脚踝康复机器人的运动范围、运动速度和运动模式。这种方式可以给康复师和患者带来更好的人机交互体验, 让患者根据自身康复情况调节适合自己的运动方式, 可有效提升康复效果。

关键词: 脚踝康复; ESP32单片机; 微信小程序; 步进电机

中图分类号: TP242; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)06-0136-04

Design of Control System for Ankle Rehabilitation Robot Based on ESP32

WU Hai-fan, LI Shu-dong, ZHU Guang-ya

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Aiming at the inconvenience and poor interaction experience of ankle rehabilitation robot through traditional upper computer control, a control system based on ESP32 microcontroller and WeChat applet is designed. The WeChat applet can communicate with the Bluetooth module of the ESP32 via the generic attribute profile (GATT) protocol. The ESP32 controls the operation of the stepper motor according to the received different instructions, realizing the adjustment of the range, speed, and mode of motion of the ankle rehabilitation robot through a mobile phone. This approach can provide a better human-computer interaction experience for rehabilitation practitioners and patients, allowing patients to adjust their own exercise styles according to their own rehabilitation conditions, which is of great significance for improving the rehabilitation effect.

Keywords: ankle rehabilitation; ESP32 microcontroller unit; WeChat applet; stepper motor

0 引言

脑卒中(俗称中风)是一种多发于老年人群的脑血管疾病, 具有高发病率、高致残率、高死亡率、高复发率、高经济负担五大特点^[1]。脑卒中常常会诱发偏瘫, 偏瘫患者经常会因长时间卧床不起和缺乏运动引起局部血管受压和深静脉血栓, 造成肌痉挛, 甚至造成生命危险。

脚踝康复机器人可以为脑卒中患者提供踝关节的跖屈和背屈、内收和外展、内翻和外翻3种自由度康复训练, 进而实现踝关节屈伸和绕环运动, 促进小腿三头肌及胫骨前肌有节律地收缩和舒张, 从而像“泵”一样加快下肢血流速度, 减轻血流淤滞^[2]。

目前, 国内外脚踝康复机器人种类繁多, 类型不一, 相关产品仍以研究为主, 在设计上主要采用并联结构, 并通过多动力源单独对每个自由度进行驱动。传统的脚踝康复机器人一般使用电脑软件或者可编程逻辑控制(programmable logic controller, PLC)触摸屏作为控制

系统的上位机, 既降低了器材集成度, 又增加了康复师的学习成本, 限制了应用场合, 也不便于患者根据自己的康复需求自行调节运动方式。为提升康复师和患者的人体交互体验, 本文以可在手机上操作使用的微信小程序作为控制系统的上位机, 开发了一款基于蓝牙协议与ESP32单片机通信的控制系统, 来实现对脚踝康复机器人的运行控制。

1 脚踝康复机器人控制系统设计

1.1 脚踝康复机器人结构组成

从运动学角度看, 人体的踝关节有3个自由度, 如图1所示, 分别为跖屈和背屈、内收和外展、内翻和外翻这6种运动。

由于不同患者的恢复进度不同和生理上的差异, 踝关节的运动范围也不同。如果脚踝康复机器人的运动范围和运动速度无法个性化调节, 则很有可能对患者造成二次伤害。脚踝康复机器人各个运动的运动范围要尽量

满足表1列出的踝关节最大活动角度,并且可以根据患者的自身情况进行调节,以提升实用性^[3]。

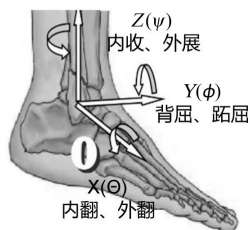


图1 踝关节3种自由度

表1 踝关节最大活动角度

运动方式	最大活动角度/(°)
跖屈	37.6~45.8
背屈	20.3~29.8
内收	22.0~36.0
外展	15.4~25.9
内翻	14.5~22.0
外翻	10.0~17.0

因此,设计的脚踝康复机器人需要满足踝关节三种自由度的康复训练并且可以自由调节行程,参见图2。使用时,患者以卧姿躺在病床上,将双脚置于转动踏板上,可以实现跖屈与背屈、内收与外展和内翻与外翻3种运动。

其中,跖屈和背屈运动由步进电机1和滚珠丝杠通过连杆连接到摆动板来实现;内收和外展运动通过步进电机2和正反牙滚珠丝杠通过两个可伸缩杆连接摆动踏板来实现;内翻和外翻运动通过步进电机3和4连接转动踏板来实现。

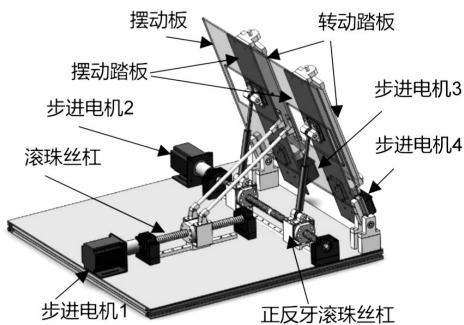


图2 脚踝康复机器人的结构组成

驱动电机的型号为57步进电机和42步进电机,步距角均为 1.8° ,即200个脉冲电机转一圈。滚珠丝杠的导程为5 mm,即丝杠转一圈滑块位移5 mm。滚珠丝杠的行程为235 mm,当滚珠丝杠的滑块处于两个极限位置时,跖屈和背屈运动可以达到最大运动范围 50.3° 。正反牙滚珠丝杠的正向螺纹和反向螺纹均为215 mm,两个滑块的极限位置也可以达到内收和外展运动的最大运动范围 39.5° 。内翻和外翻运动的范围由步进电机3和4控制,控制输入脉冲的个数,即可改变电机转过的角度。因此,

设计的脚踝康复机器人的结构可以实现跖屈和背屈、内收和外展、内翻和外翻3种自由度的运动,并且每个自由度的运动都可以进行运动范围的调节。

1.2 控制系统硬件设计

如图3所示,脚踝康复机器人的控制系统由ESP32单片机作为主控芯片,与STM32相比,ESP32体积小、性能稳定,可作为独立系统通过SPI/SDIO或者I2C/UART接口来提供Wi-Fi和蓝牙功能^[3],不需要额外扩展,专为移动设备和物联网应用设计。

当ESP32的蓝牙模块读取到来自微信小程序的写入信息后,会根据信息来控制相应的步进电机以不同的方式运行,实现不同的康复运动。

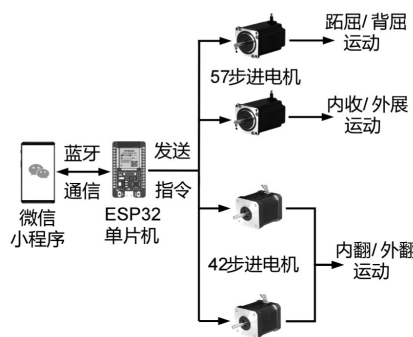


图3 控制系统方案

2 调节运动范围、运动速度的实现

跖屈和背屈、内收和外展、内翻和外翻运动的运动范围和速度均设定了三挡可调。现以跖屈和背屈运动为例分析调节运动范围及速度的实现方法。

调节运动范围可以通过调节步进电机正反转的时间间隔(滑块位移长度)来实现,滑块位移与运动范围对应关系如表2所示。

表2 滑块位移和运动范围对应关系

滑块位移/mm	运动范围/(°)
170	50.3
120	33.1
80	25.3

调节运动速度可以通过调节电机的转速来实现。直流电机可以通过调节脉冲信号的占空比进行转速控制^[4],而步进电机的转速只与脉冲的频率(即每秒脉冲的个数)有关,如表3所示。

表3 脉冲频率和电机转速对应关系

脉冲频率/Hz	电机转速/(r·min ⁻¹)
500	150
1 000	300
1 500	450

步进电机1的方向信号和脉冲信号分别由ESP32的GPIO12和GPIO13两个引脚控制,其中GPIO12的高电平代表正向,低电平代表反向,GPIO13的每秒钟脉冲个数(频率)控制转速。

当设定跖屈和背屈运动的运动范围和运动速度均为2档时,使用逻辑分析仪对ESP32的GPIO13和GPIO12两个引脚的脉冲输出进行测量,得到图4所示的波形图, Digital 0代表脉冲频率, Digital 1代表方向。在 Digital 1高电平期间 Digital 0中脉冲的个数为4 800。此时滑块的位移为

$$x = \frac{4\ 800 \times 1.8^\circ}{360^\circ} \times 5\ \text{mm} = 120\ \text{mm} \quad (1)$$

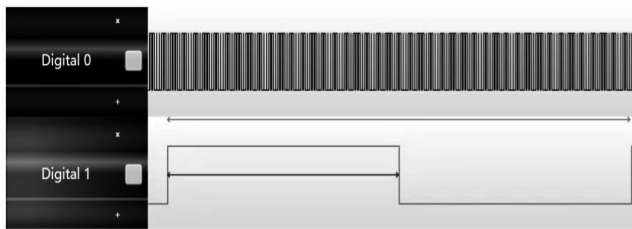


图4 GPIO13和GPIO12引脚的脉冲波形

3 微信小程序和ESP32的蓝牙通信

3.1 GATT 蓝牙通信协议

低功耗蓝牙是从蓝牙4.0起支持的协议,与经典蓝牙相比,功耗极低、传输速度更快,但传输数据量较小,常用在对续航要求较高且只需小数据量传输的各种智能电子产品中,比如智能穿戴设备、智能家电等,应用场景广泛。

基于ESP32自带的BLE低功耗蓝牙功能,可以通过GATT通用属性协议实现两个连接设备的数据通信。两个连接的设备分别充当GATT服务端和GATT客户端两个角色。GATT服务端供客户端读取或写入,GATT客户端可以向服务器请求写入或读取,以此实现客户端和服务端的双向通信。

通用唯一识别码(universally unique identifier,UUID)是一个随机的、全球唯一的16进制通用唯一识别码,一个ESP32可以建立多个蓝牙服务,所以两个设备需要根据设备UUID和服务UUID握手成功后才能建立连接。

如图5,脚踝康复机器人的控制系统中,微信小程序作为GATT客户端,通过校验ESP32的设备UUID和脚踝康复机器人Service的UUID完成蓝牙连接。当需要控制步进电机运动时,小程序会校验步进电机特征值的UUID,校验成功后小程序端会得到一系列特征值,然后遍历出可写入的特征值,并在可写入特征值的Value中写入相应的电机编号和运动方式。ESP32在接收到消息后,会判断让相应的步进电机执行运动。

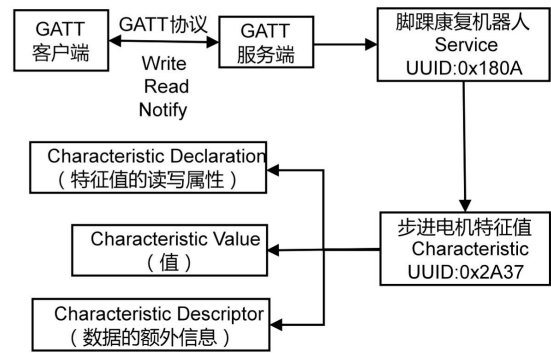


图5 脚踝康复机器人GATT通信流程

3.2 微信小程序界面开发

微信小程序交互界面基于腾讯推出的微信开发者工具开发,小程序的基础架构由视图层和逻辑层两部分组成。视图层由一个个Page组成,一个Page代表一个展示的页面,页面间通过路由跳转。每个Page页面都由WXML(weixin markup language)文件和WXSS(weixin style sheets)文件组成,WXML是微信团队基于HTML封装的标签语言,主要用于构成页面的基本视图结构,WXSS是基于层叠样式表(cascading style sheets,CSS)封装的样式语言,主要用于对页面的样式进行美化^[5]。逻辑层由JavaScript语言实现,是小程序进行数据请求、逻辑处理的关键。

表4为微信团队提供的蓝牙相关的一系列API接口,可以帮助开发者快速开发。

表4 微信蓝牙相关API接口

API接口	功能描述
wx.openBluetoothAdapter()	初始化蓝牙模块
wx.startBluetoothDevicesDiscovery()	开始搜寻附近的蓝牙外围设备
wx.onBluetoothDeviceFound()	监听搜索到新设备的事件
wx.createBLEConnection()	连接蓝牙设备
wx.getBLEDeviceCharacteristics()	获取蓝牙设备某个服务中所有特征
wx.writeBLECharacteristicValue()	向蓝牙设备特征值中写入数据



图6 微信小程序界面

在图6示的微信小程序界面中,点击“连接蓝牙”按钮,会触发一个回调函数,在函数中进行蓝牙的初始化、根据设备ID和服务ID连接ESP32设备等操作。当选择好运动模式、运动范围和运动速度等参数后,点击“开始运动”按钮,会收集当前选择的参数信息,以字符串形式发送给ESP32。

点击“开始运动”按钮,小程序在回调函数中调用 wx.writeBLECharacteristicValue() 函数向可写入特征值的 Value 中写入“1-321”字符串。其中数字1代表运动模式为跖屈和背屈,对应步进电机1,数字3代表运动范围最大,数字2代表中等转速,最后的数字1代表连续运动。

3.3 ESP32 单片机程序开发

ESP32 单片机上的程序基于 MicroPython 语言开发, MicroPython 是由 Python3 编程语言的精简实现,可以在单片机等受限环境中运行^[7]。

在 ESP32 中安装 MicroPython 编译器固件后,将相关代码写在 boot.py 文件中,该文件会在 ESP32 上电后立即执行。代码主体由 motor1Run(mode)、motor1Run(mode)、motor34Run(mode)3 个函数组成,分别用于向不同电机对应的引脚发送脉冲信号。当 ESP32 接收到来自小程序的字符串消息后,会通过 if-else 判断字符串开头第一个数字,并执行对应的函数。字符串的后续字符作为参数 mode,传入函数中用于输出不同的脉冲波形,满足运动范围和运动速度的可调。图7是控制系统的执行流程。

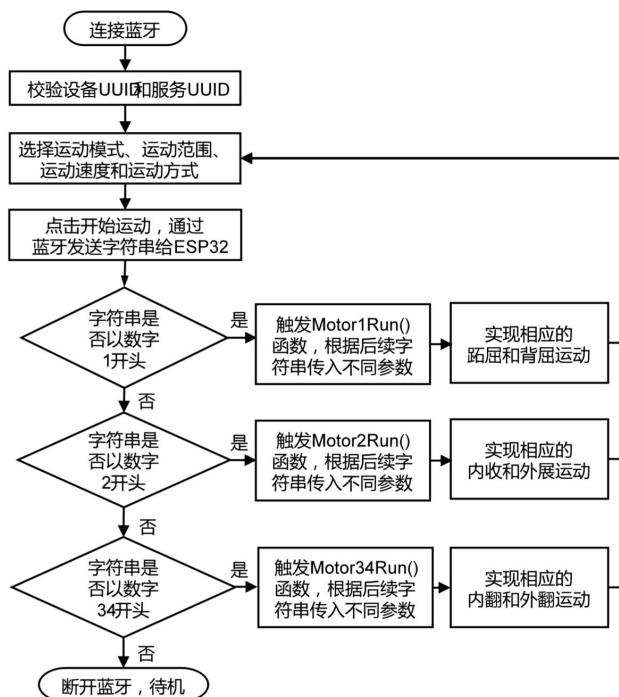


图7 控制系统执行流程

4 结束语

本文为脚踝康复机器人设计了基于ESP32单片机和微信小程序的控制系统。该系统通过蓝牙连接,对患者使用机器人进行单一自由度的跖屈和背屈、内收和外展、内翻和外翻基础训练有很好的控制效果,可极大提升使用者的便捷性。就本控制系统而言,对绕环等复合自由度训练的控制功能还有待开发,需要进一步采集患者踝关节运动数据,分析各电机运动,建立运动模型,进而完成程序编写工作,后续增加系统对复合训练的控制功能。

参考文献:

- [1] 王陇德,彭斌,张鸿祺,等.《中国脑卒中防治报告2020》概要[J].中国脑血管病杂志,2022,19(2):136-144.
- [2] 王金萍,李亚杰,李海燕.踝泵运动预防下肢深静脉血栓形成的研究进展[J].中国血管外科杂志(电子版),2022,14(4):376-378.
- [3] 李晓丽,梅珑,郭淑英,等.髋关节外骨骼机器人实时助力控制研究[J].自动化技术与应用,2024,43(6):28-31,42.
- [4] 李玉军.基于ARM的直流电机PWM调速系统设计[J].工程与试验,2022,62(4):108-110.
- [5] 印正誉,姚春羽,蔡仲言.一种基于ESP32的智能电表无线通信模块设计[J].数字技术与应用,2021,39(7):16-18.
- [6] 金峰.基于微信小程序的家用物联网系统开发[D].杭州:浙江大学,2019.
- [7] 李东明.基于MicroPython和ESP32的家庭环境监控系统设计[J].科技创新与应用,2021,11(34):32-35.

作者简介:吴海帆(1968—),男,博士,副教授,研究方向:流体控制及康复机器人。