

基于模糊 PID 控制的智能艾灸机械臂设计

陈蔓林 岳靖 曹栩睿 彭学健 黄治铭 李丹

电子科技大学成都学院, 四川 成都 610000

[摘要]随着医疗技术的进步, 医用机械臂越来越广泛地应用于手术、康复等领域, 以 STM32F405RGT6 芯片为主控核心, 实现艾灸机械臂控制系统的设计。该系统采用模块化设计, 包括主控模块, 驱动模块, 传感模块, 人机交互模块。采用 PID 模糊控制, 传感器高精度控温调节, 利用 OpenCV 实现 AI 影像分析, 实现三种穴位选择和艾灸手法模拟, 同时加入艾烟净化系统, 实现环保与个性化需求的双优结合。

[关键词]STM32F405RGT6 芯片; 主控模块; 电机驱动模块; 传感模块; OpenCV; AI 影像分析

DOI: 10.33142/sca.v8i4.15931

中图分类号: TP789

文献标识码: A

Design of Intelligent Moxibustion Robot Arm Based on Fuzzy PID Control

CHEN Manlin, YUE Jing, CAO Xurui, PENG Xuejian, HUANG Zhiming, LI Dan

Chengdu College of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: With the advancement of medical technology, medical robotic arms are increasingly widely used in fields such as surgery and rehabilitation. The STM32F405RGT6 chip is used as the main control core to design the control system for moxibustion robotic arms. The system adopts a modular design, including a main control module, a driver module, a sensing module, and a human-computer interaction module. Adopting PID fuzzy control, high-precision temperature control adjustment of sensors, utilizing OpenCV to achieve AI image analysis, realizing three types of acupoint selection and moxibustion technique simulation, while adding moxa purification system, achieving a dual optimization combination of environmental protection and personalized needs.

Keywords: STM32f 405RGT6 chip; main control module; motor drive module; sensing module; OpenCV; AI image analysis

引言

在一些医疗设备的使用场景中, 如 TDP (特定电磁波谱疗法) 治疗仪和熏艾治疗, 通常需要将设备长时间定位在患者的特定部位进行治疗。为了确保治疗效果, 医生通常会借助支架等工具将医疗设备牢固固定在特定位置, 以维持设备与患者病灶部位的适当距离, 并进行照射或熏艾一定时间。然而, 在治疗过程中, 医生可能难以同时照顾多名患者, 导致某些情况下患者的特定部位可能会出现照射或熏艾时间过长或过短的情况, 从而影响治疗效果。

作为医疗领域机器人技术的重要应用, 艾灸机械臂可以在康复治疗中辅助医生同时照顾多位病人, 机械臂可以沿着预定的轨迹移动, 保证设备与病人的特定部位保持适当的距离, 从而保证照射或熏艾时间的精确, 提高治疗效果。

1 系统设计

本设计基于 STM32F405RGT6 主控芯片, 开发六自由度红外艾灸智能机械臂系统。该系统集成高精度温度控制模块 (MCP9808 传感器)、人机交互终端及艾烟净化装置, 通过 OpenCV 的图像处理能力实现穴位精准定位。机械臂采用闭环控制算法, 确保艾灸头与皮肤保持 1~3cm 稳定距离, 温度波动范围控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 内。艾烟净化模块通过负压风机与活性炭过滤层, 实现 95% 以上烟雾吸附率, 符合医疗环境空气质量标准。整体设计兼顾治疗精度与环

保需求, 适用于中医康复领域的智能化诊疗。

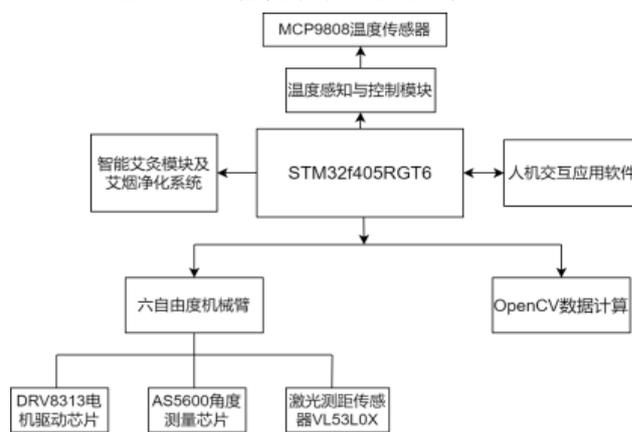


图 1 医疗机械臂整体构造图

1.1 六自由度机械臂系统模块

1.1.1 电机驱动模块

该模组采用 TB6612 双向直流马达驱动晶片, 利用 STM32F405RGT6 微控制器进行实时控制。把 OpenCV 摄像机模块传回的图像处理数据提取关键控制信息后, 通过串口将这些处理后的数据传输到步进马达驱动系统。采用这种方式, STM32F405RGT6 能够精准地控制步进电机的运行状态, 从而实现整个系统的自动化控制和最终预期的运行效果。

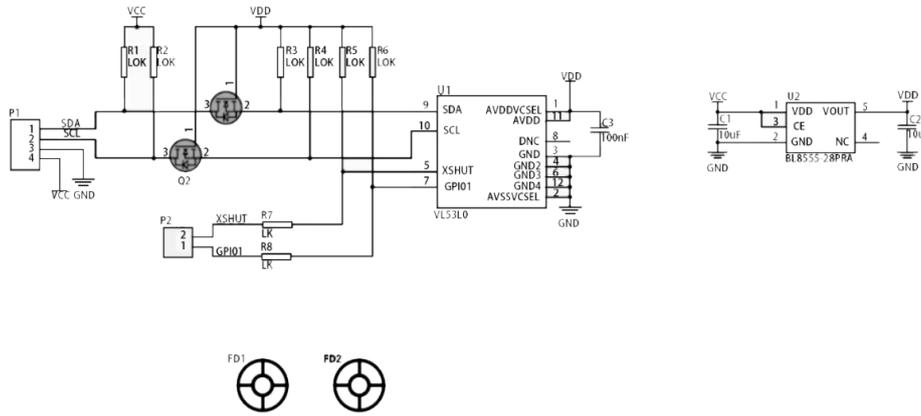


图2 激光测距传感器 VL53L0X

1.1.2 角度和距离测量

角度模块采用 AS5600 芯片，该芯片基于磁力原理工作。它通过对周围磁场变化的探测，精确地确定传感器所处的位置与磁场相对。此外，其简易的接口和低功耗设计，使得集成到系统中变得更加方便。激光测距传感器选择 VL53L0X，通过发射激光脉冲并测量其反射回传感器的时间来确定目标物体的距离。

1.2 温度控制与模块选择

1.2.1 温度传感器的选择

选择温湿度传感器 MCP9808 结合测距传感器，实时检测灸头到皮肤表面的距离，调整治疗温度的设定值，以适应红外理疗、艾灸过程中对温度的需求，同时结合关节的灵活度调整、姿势的长期稳定性以及外界温湿度等环境因素的变化，实时调整距离。温湿度感应器中，模组 DHT11 在不同的温湿度条件下，将不同的电压反馈给主控晶片，主控晶片处理后，在数码管上显示出来。

1.2.2 温度调节的方法

双机械臂分别连接 TDP 治疗仪与熏艾机构，预设时间到后自动分离。其中一臂配置伸缩组件，可调节与 TDP 的距离，并通过前端集成的温度传感器来实时监测治疗区温度。为了调节红外和艾灸理疗的体表温度，我们主要采用模糊 PID 控制，实现温度的自动切换。

控制策略分为两步实施：

(1) 分档控制：系统通过粗调快速减小大误差 $EC = |e(t)| / E_{max}$ (归一化误差)，并通过动态调节动力档位 (如图中分档控制模块所示) 抑制超调。

(2) 模糊 PID 控制：输入部分 $e(t) = r(t) - Y(t)$ 为误差信号、 de/dt 为误差变化率、误差上下文 $EC = |e(t)| / E_{max}$ (归一化误差)， K_d, K_p, K_i 分别为微分增益，比例增益和积分增益。根据误差阶段优化增益参数。初期 ($EC > 0.8$) 时， $K_i = 0$ (关闭积分通道，防积分饱和)。 $K_d \downarrow$ (减少对动态响应的抑制)， $K_p \uparrow$ (加速误差收敛)；中期时 ($0.5 < EC \leq 0.8$)， $K_p \downarrow$ (降低增益以抑制过冲)， $K_d \uparrow$ (增大微分增益以预测误差趋势)， $K_i \approx \text{适中}$ (补偿稳态误差)；

后期 ($EC \leq 0.5$)， $K_p \uparrow$ (提高比例增益以修正微小偏差)， $K_i \uparrow$ (增强积分增益以消除残余误差)， K_d 进行动态调节，若 EC 小 (接近目标)， $K_d \uparrow$ (增强灵敏度)，若 EC 大 (误差反复)， $K_d \downarrow$ (防振荡)。

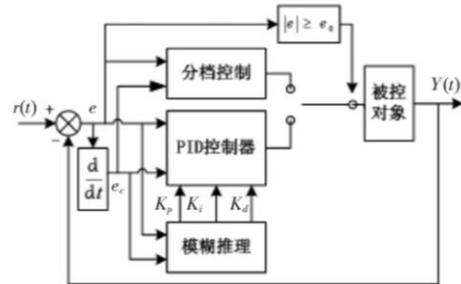


图3 温度感知闭环系统控制图

1.3 智能艾灸模块

智能艾灸模块由两大部分组成：一是由高压电源 SKR-08WDC-001 模块、铝制金属铜和光敏树脂非金属容器构成艾烟进化系统；二是智能穴位选择与手法模拟系统。由这两大板块协同发力，让用户艾灸体验更加高效便捷。

利用电晕放电产生负离子的原理，将艾灸过程中产生的艾烟颗粒带电，吸附在具有高压电场的净化装置筒壁上，从而达到除烟的效果。高压电源 SKR-08WDC-001 模块，针对空气净化器因使用环境、负载变化等因素造成的臭氧超标问题，通过闭环控制器控制输出电压和电流，可有效抑制。

灸法模拟实现路径：基于温和灸、雀啄灸、回旋灸三种技法，融合 D-H 机械臂建模与 MATLAB Robotics Toolbox 平台，通过 DOBOTMagician 二次开发完成运动学仿真，建立笛卡尔空间位移时序曲线，解算关节角度/角速度/角加速度三阶运动参数，实现灸疗动作数字化建模。

穴位定位系统实现路径：基于 OpenCV 构建三阶段处理架构，采用 OV7725 传感器 (640×480@60fps) 实施多模态图像采集，通过色阈值分割、轮廓检测、质心计算实现穴位点定位，结合摄像机标定完成像素-机械臂坐标系转换，集成降噪/双边滤波/畸变校正/对比度增强四重预处理算法提升识别精度。

2 控制算法

2.1 算法实现流程

该系统的软件设计流程主要是微控系统。系统控制涵盖温度感知与控制模块、智能艾灸模块、智能 TDP 控制模块、艾烟净化模块以及以太网通讯模块。首先，启动理疗机械臂后，可以通过远程控制或直接控制选择理疗模式，再调整机械臂到恰当的位置，机械臂开始穴位的识别以及定位，接着根据当前的位置和穴位定位的数据通过 PID 运算及 PWM 脉冲控制机械臂的电机运动。在理疗的过程中，机械臂也会实时的进行人体表面的温度数据的检测与采集，并显示在机械臂屏幕上。再将采集的温度数据与设定的温度进行比较，根据不同的比较结果来控制艾烟净化装置和过温保护装置，保证能够安全理疗的同时又不污染环境。

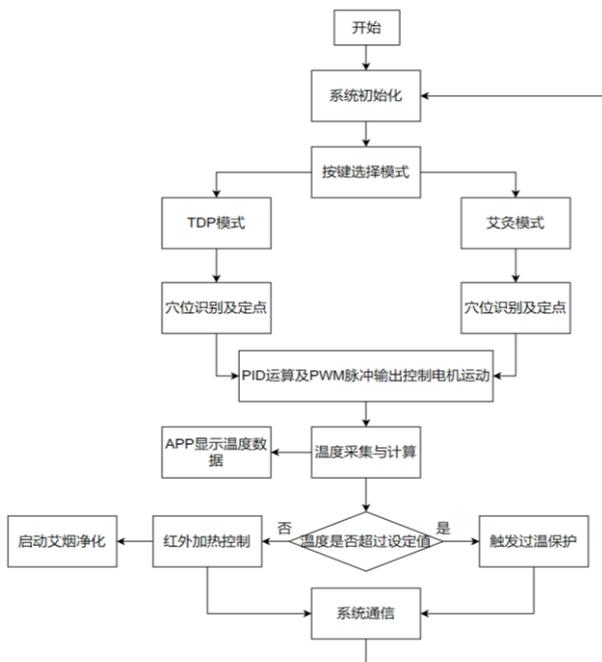


图 4 TDP 和艾灸双模式实现流程图

2.2 机械臂整体定位算法流程

机械臂穴位定位系统通过灰度化-阈值分割二值化处理图像，采用 FindContours 算法结合图像矩法提取质心坐标。经 PID 调控的三相驱动模块（含 Clark/Parker 变换、SVPWM 调制）驱动伺服电机，配合编码器闭环反馈实现 μm 级定位精度。系统具备动态轨迹优化与电流电压精准控制功能。

其中，在对机械臂的控制以及穴位定位中，“Clark 变换”和“Park 变换”将主要用于将三相交流电信号转换为更易于处理的两相交流信号和直流信号。“Clark 变换”的主要目的是将三相系统（通常是电流或电压）转换为两个正交的信号，这两个信号通常称为 α 轴 (I_α) 和 β 轴 (I_β)。这让得分析和控制变得更加直观和简便。其中假定三相电流为： I_a, I_b, I_c 。那么：

$$I_\alpha = I_a - \frac{1}{2} I_b - \frac{1}{2} I_c \quad (1)$$

$$I_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} I_b - \frac{\sqrt{3}}{2} I_c \quad (2)$$

“Clark 变换”将三相信号压缩为两相信号，但并不会将交流信号转换为直流信号，而是使得后续的分析（如帕克变换）变得更加容易。为了将两相信号 I_α, I_β 进一步转换为直流信号 I_d, I_q 我们将继续采用帕克变换：其中， θ 是旋转角度，通常与电机转子的转动角度相关。

最终，通过“Clark 变换”和“Park 变换”，将三相交流信号转换直流信号，大大简化了分析过程以及控制过程，使对电机的控制更加精确和高效。

3 实验测试结果

将各个模块连接在 STM32F405RGT6 上，将程序下载到单片机芯片中，使用万用表检测电路是否正常，测试各部分功能是否正常。启动理疗臂的艾灸模式，观察并记录理疗臂穴位定位正确时，不同温湿度下机械臂的角度。



图 5 机械臂实物图和模式界面

机械臂的主页模式中，一共包含背部扫描，肌肉检测，艾灸，皮肤检测四个功能。根据实验结果看出，四个功能在不同的环境温度和湿度中，机械臂的角度旋转相对误差都较小，控制在 1° 到 2° 的角度偏差范围内，同时即使在温度和湿度波动的情况下，医疗臂的理疗温度误差范围也能控制在 0 到 0.18°C ，确保在实际操作中实现高效的定位与运动。该特性使设备在多种环境下都能保持性能表现的一致性，以满足医疗领域对稳定性和可靠性的苛刻要求。

4 结论

设计并实现基于 STM32F405RGT6 的一体化智能理疗机械臂。该系统整体架构采用“机械臂+理疗端”的有机结合，实现红外和艾灸理疗功能的综合设计。六自由度机械臂通过感知、识别和控制信息，结合理疗端的特性，精确瞄准身体特定区域进行理疗。在温度调节方面，系统采用“距离温度测量+模糊 PID 控制”算法，确保与设定温度的稳定一致。同时，为了满足艾灸理疗的特定应用需求，通过结合“视觉感知+深度学习”技术，实现身体穴位的识别与定位，并模拟艾灸手法，同时净化艾灸产生的烟雾。该智能理疗臂具有智能化、高安全性等显著特点，广泛适用于医疗场所、康复机构及居家保健，

市场前景十分广阔。

[参考文献]

- [1] 张逸. 低热烧伤的特点及治疗[J]. 交通医学, 1999, 13(4): 501.
- [2] 谢宋和, 甘勇. 单片机模糊控制系统设计与应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [3] 周黎英, 赵国树. 模糊PID控制算法在恒速升温系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(2): 405-409.
- [4] 彭安娜, 袁愿, 冯金垣. 基于RFID和LABVIEW的分布式温湿度监控系统的设计[J]. 电子设计工程, 2016, 24(6): 145-148.
- [5] 林城美, 王公宝, 汪光森, 等. 基于脉冲跳变的空量矢量脉冲宽度调制策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(1): 43-51.
- [6] 杨景发, 徐景智, 赵庆勋, 等. 红外理疗的机理探讨与红外理疗仪的发展前景分析[J]. 红外, 1999(11): 9-13.
- [7] 朱嵘涛, 武洪涛. 基于增量式PID算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7): 121-126.
- [8] 李广弟. 单片机基础[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2000.
- [9] 孙育才. Atmel新型AT89S52系列单片机及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] 陆坤等. 电子设计技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1917.
- [11] 陈大钦. 电子技术基础实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [12] 周江. STM32 单片机原理及硬件电路设计研究[J]. 数字技术与应用, 2015(11): 1.

作者简介: 陈蔓林 女(2005. 1-) 电子科技大学成都学院通信工程