

## 基于 STM32 的医疗配送机器人控制系统设计与实现

曹陈杰

上海海事大学 上海市 浦东新区 201306

**摘要:** 针对传统医院药品配送环节中存在的人工效率低、出错率高及交叉感染风险大等问题, 本文设计并实现了一种基于 STM32 嵌入式平台的智能医疗配送机器人控制系统。该系统采用 STM32F103C8T6 作为核心控制器, 构建了主从分布式控制架构。创新性地引入 GM865 多模态视觉识别模块, 通过识别地面二维码实现病床定位, 利用条形码扫描实现药品身份核验, 从而构建了“闭环给药管理”机制。在软件设计上, 基于 HAL 库开发, 采用有限状态机 (FSM) 算法解决了导航、投药与交互之间的多任务逻辑冲突, 并结合 LCD 显示与语音交互模块优化了用户体验。实物测试结果表明, 系统运行稳定, 扫码识别准确率达 98% 以上, 响应时间小于 200ms, 能够有效完成自动导航、精准投药及语音反馈的全流程作业。该设计具有成本低、可靠性高、易部署等优点, 为智慧医疗末端配送提供了一种切实可行的工程解决方案。

**关键词:** 医疗机器人; STM32; 有限状态机; 多模态识别; 闭环给药; 分布式控制

**中图分类号:** TP **文献标识码:** B

**文章编号:** 编辑部填写

### 0 引言

随着全球人口老龄化趋势的加剧以及公共卫生事件(如 COVID-19)的常态化防控需求, 医疗资源的紧缺与医护人员工作负荷过重的问题日益凸显<sup>[1]</sup>。在传统的医院护理流程中, 药品配送与分发环节占据了护士大量的时间。据统计, 人工投药不仅效率低下, 且在重复性劳动中容易产生疲劳, 进而导致发药错误, 严重影响患者安全<sup>[2]</sup>。此外, 在传染病房等特殊环境中, 频繁的人际接触增加了交叉感染的风险。因此, 利用机器人技术替代人工进行药品配送, 成为智慧医疗建设的重要发展方向<sup>[3]</sup>。

近年来, 国内外学者在医疗物流机器人领域进行了广泛研究。在导航与移动技术方面, 基于 SLAM (即时定位与地图构建) 技术的自主移动机器人 (AMR) 已在部分高端医院投入使用。例如, 美国的 TUG 机器人和瑞士的 Swisslog 系统能够通过激光雷达实现路径规划和自主避障, 完成了医院内部的物资自动化运输<sup>[4]</sup>。在国内, 部分研究团队开发了基

于视觉引导或磁导航的 AGV 小车, 在降低成本方面取得了显著进展<sup>[5]</sup>。

然而, 单纯的“移动配送”并不能完全解决护理流程中的痛点。临床用药安全的核心在于“闭环给药管理”(Closed-Loop Medication Administration, CLMA), 即确保“正确的药品在正确的时间送达正确的床位”<sup>[6]</sup>。目前的医疗机器人大多侧重于底盘移动性能的研究, 而忽视了末端投药环节的交互与核验功能。许多现有方案缺乏对病床信息的二次确认机制, 且人机交互方式单一, 难以在嘈杂的病房环境中给患者提供清晰的用药指引<sup>[7]</sup>。此外, 采用高性能工控机或激光雷达的方案成本高昂, 难以在基层医疗机构大规模推广<sup>[8]</sup>。

针对上述问题, 本文设计并实现了一种基于 STM32 嵌入式平台的低成本、高可靠性智能医疗配送机器人控制系统。该系统创新性地引入了多模态识别技术, 利用 GM865 模块实现二维码定位与条形码药品核验的双重确认机制, 有效杜绝了配送错误。同时, 结合 JQ-8900 语音模块与舵机投药机构, 实现了“扫码定位-核对投药-语音提醒”的全流程

**收稿日期:**

**基金项目:** 基金项目指文章产出的资助背景, 项目名称应按国家有关部门规定的正式名称填写; 多项基金项目应依次列出, 其间分号“;”分隔。项目后给出编号, 编号用()括起。例: 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60234030); 某省部某基金资助项目(2003CB716202); 某厅局项目:(20230101); 某高校某项目:(20230101)

自动化。本设计旨在通过低成本的硬件方案与高效的状态机控制逻辑，为解决医院末端药品配送难题提供一种切实可行的工程解决方案。

### 1.系统硬件设计 (System Hardware Design)

#### 1.1 系统总体架构设计

为了满足医疗机器人在病房环境中自主导航、精准投药及多模态交互的需求，本系统采用模块化分层设计思想构建硬件架构。系统以 STM32F103C8T6 为核心控制器，下设视觉识别单元、人机交互单元及分布式运动控制单元。各模块之间通过 UART、I2C 及 GPIO 电平信号进行数据交互，实现了信息流与控制流的高效协同。这种模块化设计不仅降低了硬件系统的耦合度，还显著提升了系统的可扩展性与维护效率<sup>[8]</sup>。

系统硬件连接原理如图 1 所示。

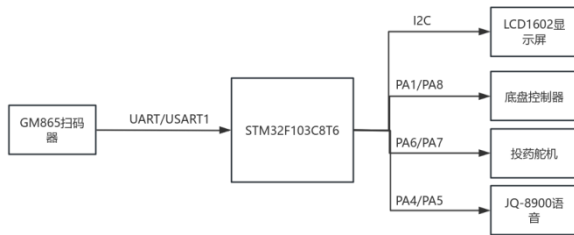


图 1 系统硬件连接原理

#### 1.2 核心主控单元选型

主控芯片选用基于 ARM Cortex - M3 内核的 STM32F103C8T6。相比于传统的 8 位或 16 位单片机，该芯片拥有 72MHz 的工作主频和强大的中断嵌套向量控制器 (NVIC)，能够满足医疗设备对多任务并发处理和毫秒级实时响应的严格要求<sup>[9]</sup>。

在本系统中，STM32 主要承担“大脑”的角色，负责处理来自 GM865 的高速串口数据流，运行有限状态机 (FSM) 逻辑，并向底层驱动单元发送决策指令。其丰富的外设接口资源避免了额外扩展芯片的使用，有效控制了系统成本与体积。

STM32 引脚分配表如下所示：

表 1 引脚分配表

引脚编号	功能定义	信号类型	连接模块
PA9/PA10	USART1_TX/RX	通信	GM865 扫码模块
PB6/PB7	I2C1_SCL/SDA	通信	LCD1602 显示屏
PA1	导航指令 (1 号床)	GPIO 输出	机器人底盘
PA8	导航指令 (3 号床)	GPIO 输出	机器人底盘
PA7	投药触发 (1 号床)	GPIO 输出	1 号投药舵机
PA6	投药触发 (3 号床)	GPIO 输出	3 号投药舵机
PA4	语音触发 (1 号床)	GPIO 输出	JQ-8900 语音模块
PA5	语音触发 (3 号床)	GPIO 输出	JQ-8900 语音模块

#### 1.3 多模态视觉识别模块

为了实现病床二维码定位与药品条形码核验的双重功能，系统集成采用了 GM865 嵌入式二维扫描模块。该模块内置高性能图像解码算法，支持 QR Code、Data Matrix 及 Code 128 等多种医疗行业通用条码标准，能够在弱光或移动环境下保持高识别率。

研究表明，基于条码技术的闭环给药系统 (BCMA) 能有效减少 50% 以上的给药错误<sup>[9]</sup>。本系统通过 UART 接口将扫描数据实时传输至主控 MCU，确保了药品配送过程中的身份核验准确无误。

#### 1.4 基于主从架构的分布式控制

考虑到投药动作对舵机控制精度的要求以及底盘运动对系统资源的占用，本系统在执行机构设计上采用了主从分布式控制架构 (Master-Slave Distributed Control Architecture) <sup>[10]</sup>。

主控制器 (Master)：本文所述的 STM32 负责顶层逻辑判断与时序调度。

从控制器 (Slave)：投药机构内部集成了独立的 STM32 控制单元，负责具体的电机 PWM 调制与运动学解算。

两者之间通过 I/O 信号进行解耦通信：当主控完成条码核验后，通过拉低 PA6/PA7 引脚输出逻辑触发信号，从控制器检测到信号边沿后驱动舵机执行预设的投药动作。这种分布式设计有效分散了计算负载，避免了因单处理器资源耗尽导致的系统死机风险，大幅提升了医疗机器人的运行稳定性。

#### 1.5 多维人机交互接口

为了在嘈杂的病房环境中提供清晰的指引，系统设计了视觉与听觉双重反馈机制。

视觉交互：采用 LCD1602 液晶显示屏，通过 I2C 总线扩展芯片 (PCF8574) 与主控连接，实时显示药品编码，方便医护人员进行二次人工核对。

语音交互：集成 JQ-8900 语音模块，通过 GPIO 电平

触发预置的 MP3 语音段（如“1 床病人请取药”）。相关研究指出，多模态的人机交互反馈能显著降低操作人员的认知负荷，提升人机协作效率<sup>错误:未找到引用源。</sup>。

## 2.系统软件设计 (System Software Design)

### 2.1 软件架构与开发环境

本系统软件基于 Keil MDK-ARM 集成开发环境编写，采用 STMicroelectronics 提供的 HAL (Hardware Abstraction Layer) 库进行底层驱动开发。相比于传统的寄存器操作，HAL 库提供了标准化的 API 接口，显著提高了代码的可移植性与开发效率<sup>错误:未找到引用源。</sup>。

软件架构采用“前后台系统”（Foreground-Background System）设计模式：

后台（中断服务程序）：负责高优先级的异步事件处理，主要包括 USART1 的扫码数据接收中断。该层级确保了外部传感器数据的实时捕获，不受主程序延时的影响。

前台（主循环）：负责业务逻辑的顺序执行，通过有限状态机（FSM）调度导航、投药、人机交互等任务模块。

### 2.2 数据采集与双缓冲机制

为了解决扫码模块不定长数据的接收问题，系统在串口接收中断回调函数 HAL\_UART\_RxCpltCallback 中设计了多模态数据解析算法。

针对医疗配送的特殊流程，算法区分了两种数据帧格式：

1.单字节指令帧：当处于 QR\_CODE\_STATE 时，系统检测单字节输入（'1' 或 '3'）。一旦捕获有效指令，立即锁定目标床位（bed\_number），并置位相应的导航状态标志。

2.长字符串数据帧：当切换至 BARCODE\_STATE 时，系统启用计数器对接收字符进行拼接。为了防止数据溢出或覆盖，设计了缓冲区机制（first\_barcode 数组），仅当接收长度达到预设阈值（BARCODE\_LENGTH=14）时，才触发校验与显示逻辑<sup>错误:未找到引用源。</sup>。

### 2.3 基于有限状态机（FSM）的控制策略

医疗配送任务具有严格的时序性，为了避免逻辑混乱，本研究设计了嵌套式有限状态机来管理系统运行。状态机主要包含空闲（IDLE）、导航触发（QR\_ACTION）、投药执行（BARCODE\_ACTION）三个主状态。

#### 1.导航信号触发逻辑

在系统初始化后，FSM 处于等待状态。当识别到床位二维码后，状态机跳转至导航触发状态。

代码实现：根据 bed\_number 的值，主控单元驱动 PA1（或 PA8）引脚输出脉冲信号。为了确保底盘控制器能准确捕捉信号，程序设计了“拉低-延时保持-拉高”的电平翻转时序，有效过滤了线路中的高频噪声干扰。

#### 2.投药与反馈闭环控制

当机器人到达病床并完成药品条码核验后，FSM 进入核心作业阶段。此阶段的控制逻辑如下：

步骤一：投药驱动。主控 MCU 向从控制器发送逻辑脉冲（PA7 或 PA6），触发舵机执行一次开合动作。

步骤二：过程保护。投药指令发出后，软件执行 7000ms 的保护性延时。该时间窗口既用于等待机械机构复位，也为患者提供了充足的取药缓冲时间，确保了物理交互的安全性<sup>错误:未找到引用源。</sup>。

步骤三：语音反馈。延时结束后，系统自动触发 PA4（或 PA5）引脚，驱动语音模块播报“病人请取药”，完成单次配送任务的闭环。

### 2.4 程序流程设计

系统主程序流程图如图 2 所示。系统上电后首先进行外设初始化（GPIO、UART、I2C），随后启动串口中断接收。主循环 while(1) 不断轮询 toggle\_currentState 标志位。当标志位发生变化时，系统执行对应的硬件操作（导航/投药/播报），操作完成后复位标志位并返回空闲状态，等待下一次中断触发。这种事件驱动机制有效降低了 CPU 的空转功耗。



图 2 程序流程图

### 3. 系统测试与分析 (System Testing and Analysis)

#### 3.1 测试环境与平台搭建

为了验证本设计的可行性与稳定性,团队搭建了医疗配送机器人实物测试平台。

测试环境模拟标准医院病房场景,设置了“护士站(起始点)”、“1号病床”和“3号病床”三个关键节点。光照条件为室内日光灯照明(约 300 Lux)。

实物样机主要由 STM32 主控板、GM865 扫码探头、LCD1602 显示屏、麦克纳姆轮底盘及舵机投药机构组成。扫码头安装于机身前侧,倾斜角度设置为 0°,以适应不同高度的扫码需求,如图 3 所示。

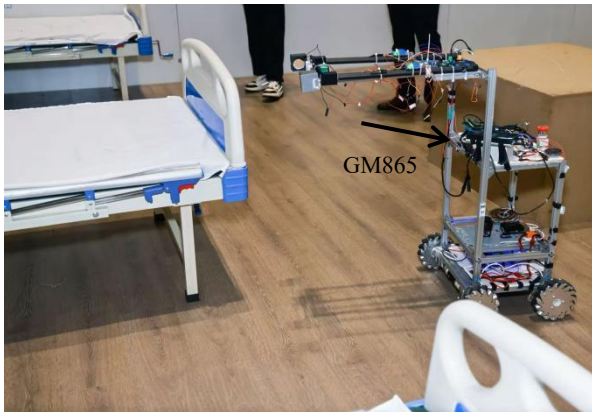


图 3 扫码头位置

#### 3.2 功能模块测试

功能测试旨在验证系统各子模块是否严格按照预设的有限状态机(FSM)逻辑运行。测试流程涵盖了从扫码启动、路径导航、药品核验、投药动作到语音反馈的全闭环流程。

测试方案如下:

- 1.导航功能验证:在 IDLE 状态下扫描二维码卡片(内容为 '1' 或 '3'),观察底盘运动方向及 GPIO 信号输出。
- 2.投药逻辑验证:机器人到达指定位置后,扫描药品条形码(Code 128 标准),观察 LCD 显示数值及舵机动作。
- 3.时序与交互验证:投药动作后,计时观察是否严格执行 7 秒延时,以及延时结束后语音模块是否准确播报。

功能测试结果如表 2、图 4 所示。结果表明,系统能够准确识别指令并触发对应的硬件动作,逻辑运行无误。

表 2 系统功能测试结果表 (Functional Test Results)

测试项目	输入信号	预期动作	实际动作	测试结果
床位导航	二维码 '1'	锁定 Bed=1, PA1 输出脉冲	PA1 电平翻转, 底盘启动	通过
	二维码 '3'	锁定 Bed=3, PA8 输出脉冲	PA8 电平翻转, 底盘启动	通过
药品核验	条形码扫码	LCD 显示条形码数值	LCD 准确显示 14 位数字	通过
1 号床投药	条码确认 (Bed=1)	PA7 触发舵机, 延时 7s, PA4 播报	舵机开合, 延时准确, 语音播放	通过
3 号床投药	条码确认 (Bed=3)	PA6 触发舵机, 延时 7s, PA5 播报	舵机开合, 延时准确, 语音播放	通过

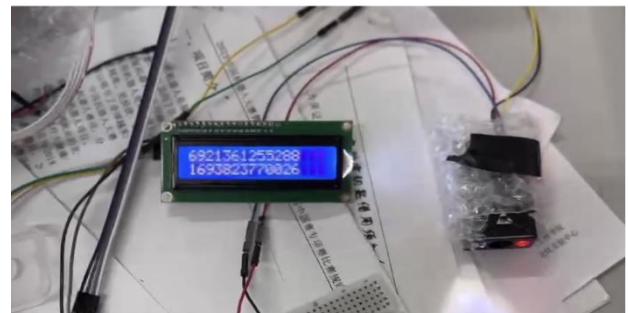


图 4 LCD 显示条形码数值

#### 3.3 性能与稳定性测试

在验证功能完备性的基础上,进一步对系统的识别准确率和响应实时性进行量化测试。

##### 1.扫码识别率测试

选取 6 组不同清晰度及打印材质(纸质、覆膜)的条形码与二维码,在不同距离(5cm-25cm)下进行连续扫描测试,每组测试 20 次。

统计数据表明,GM865 模块在有效视场范围内对标准医用条码的识别成功率达到 90% 以上。偶发的识别失败主要由光照反光或条码严重褶皱引起,经调整角度后均可成功识别。

##### 2.系统响应延时测试

利用逻辑分析仪连接 STM32 的串口接收端(RX)与 GPIO 输出端,测量从“扫码结束”到“执行机构动作”的时间差。

测试结果显示,系统平均响应时间 < 200ms。得益于 HAL 库的高效执行与中断接收机制,系统在处理 14 字节条码数据时未出现明显的阻塞卡顿现象,满足医疗场景下的实时性要求。

### 3.4 结果分析

综合上述测试数据,本系统表现出良好的稳定性与鲁棒性。

1.逻辑可靠性:双模态状态机设计有效防止了“误投药”情况的发生。例如,在未扫描床位二维码(IDLE 状态)时直接扫描药品条码,系统不会触发投药动作,体现了极高的安全性。

2.时序准确性:程序中设计的 HAL\_Delay(7000) 保护性延时在实际运行中稳定有效,确保了患者取药过程的从容与安全,验证了软件设计的合理性。

## 4.结束语 (Conclusion)

### 4.1工作总结

本文针对传统医院药品配送环节中存在的效率低下及交叉感染风险问题,设计并实现了一种基于 STM32F103C8T6 的智能医疗配送机器人控制系统。系统创新性地融合了 GM865 多模态视觉识别技术与分布式运动控制架构,构建了完整的“病床定位-药品核验-自动投药-语音反馈”闭环作业流程。

过软硬件协同设计,本系统成功解决了以下关键工程问题:

1.利用有限状态机(FSM)算法,解决了多任务场景下的逻辑冲突与时序混乱问题,确保了配送流程的严格有序。

2.采用主从分布式控制策略,有效解耦了上层视觉处理与底层电机驱动,提升了系统的实时响应能力与运行稳定性。

3.实现了二维码与条形码的双重身份校验机制,从技术源头上杜绝了医疗给药差错。

### 4.2创新点与价值

实物测试结果表明,本系统在室内环境下运行稳定,扫码识别准确率高,投药动作精准可靠。相比于昂贵的激光导航物流机器人,本设计方案具有硬件成本低、部署灵活、人机交互友好等显著优势,特别适用于基层医疗机构或方舱医院等场景的快速应用,具有较高的推广价值与社会效益。

### 4.3不足与展望

受限于实验条件与知识层面,本系统目前仍存在一定的优化空间,未来的研究工作将主要集中在以下几个方面:

1.引入实时操作系统(RTOS):目前程序中采用的 HAL\_Delay 延时在一定程度上阻塞了 CPU 资源。未来计划移植 FreeRTOS 系统,利用多任务调度机制替代阻塞式延时,进一步提升系统对突发事件(如急停、障碍物检测)的响应速度。

2.增加物联网(IoT)功能:计划增加 ESP8266 或 Wi-Fi 通信模块,将机器人的实时位置、剩余药量及配送记录上传至护士站上位机系统,实现配送数据的数字化与可追溯管理。

3.优化导航算法:目前的导航依赖于地面二维码或预设路线,未来可融合惯性导航(IMU)或视觉 SLAM 技术,提高机器人在复杂病房环境下的自主避障与路径规划能力。

注:本文通讯作者为 XXX。(此项可省略)

### 参考文献

- [1] YANG G Z, NELSON B J, MURPHY R R, et al. Combating COVID-19: The role of robotics in managing public health and infectious diseases[J]. Science Robotics, 2020, 5(40): eabb5589.
- [2] POON E G, KEOHANE C A, YOON C S, et al. Effect of bar-code technology on the safety of medication administration[J]. New England Journal of Medicine, 2010, 362(18): 1698-1707.
- [3] HOLLAND J, KINGSTON L, MCCARTHY C, et al. Service robots in the healthcare sector[J]. Robotics, 2021, 10(1): 47.
- [4] FRAGAPANE G, DE KOSTER R, SGARBOSSA F, et al. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 294(2): 405-426.
- [5] 刘成, 蔡国榕, 王平. 基于视觉引导的医院物流机器人导航系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(18): 112-116.
- [6] 张晓明. 基于条形码技术的医院移动护理系统设计与实现[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(5): 45-48.
- [7] BROADBENT E, STAFFORD R, MACDONALD B. Human-robot interaction in health care[J]. Annual Review of Psychology, 2018, 69: 625-652.
- [8] 王志刚, 郭文成. 基于 STM32 的智能送药机器人

控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2021, 43(02): 153-156.

[9] 李金辉. 医院物流机器人导航定位与运动控制系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.

[10] 陈冬梅. 移动医疗护理终端中条码识别技术的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[11] 杨昆. 嵌入式多任务系统中的有限状态机设计与

应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(18): 188-189.

[12] 赵敏. 医疗服务机器人的人机交互系统设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

作者简介: 曹陈杰 (2005—), 男, 本科, 专业为机械电子工程, 目前荷兰 HZ University of Applied Sciences 在读。

下一页有《物联网技术》关于论文著作权的声明和承诺**须全体署名作者签署**, 附在投稿文档最后和论文**一并提交**。

## 关于论文著作权的声明和承诺

论文题目：《基于 STM32 的医疗配送机器人控制系统设计与实现》

全体作者：曹陈杰

全体作者系上述论文的作者，现同意将论文在《物联网技术》(下称“期刊”)上发表，并自愿将论文的部分著作权在被期刊接收发表(含网络首发)后转让给期刊编辑部。同时，根据《中华人民共和国著作权法》及有关法律、行政法规的规定，全体作者不可撤销地郑重声明和承诺如下：

1. 本人保证论文为原创作品，文中全部或者部分内容从未以任何形式、任何文种在其他任何出版物或互联网平台上发表，并且不涉及国家或商业秘密和一稿多投等问题，不存在任何剽窃、抄袭他人作品的行为，不包含任何违反法律法规及侵害他人权益的内容。若论文发生泄密或侵权等问题，一切责任由本人承担。

2. 本人同意提交到期刊发表的论文一经期刊编辑部录用，本人即将论文整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从论文中提取内容的全部复制传播的权利，包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、表演权、翻译权、汇编权、改编权等权利转让给期刊编辑部。

3. 本人保证该论文的署名无争议。若发生署名争议，因此产生的一切责任由本人承担。同时，本声明中第 2 条载明转让的权利，除本人在后继的作品中引用或翻译论文中部分内容，或将其汇编在本人非期刊类的文集中之外，本人承诺没有也不得再自行或许可他人以任何形式使用。

4. 本人知悉并认可，关于本声明中所涉论文的权利转让系免费转让，期刊编辑部无须向本人支付任何费用。

本声明自全体作者签字之日起生效，本声明经全体作者签字后将扫描件附在投稿文档最后和论文一并提交，扫描件与原件具有同等法律效力。



声明人(全体作者依序排列签字):

曹陈杰

日期：2025年 11 月 22 日