

面向视障辅助的嵌入式实时抢占调度策略设计与验证

赵景辉 王华君* 代林林

无锡太湖学院, 中国·江苏 无锡 214064

摘要: 针对资源受限的嵌入式视障辅助设备中, 导航语音任务与近身避障任务并发时易出现安全提示被覆盖的调度冲突问题, 提出一种面向视障辅助的嵌入式实时抢占调度策略。该策略在无操作系统的裸机框架下, 将近障触觉反馈任务设定为最高优先级, 支持安全事件对导航播报任务的无条件抢占, 并引入分级语音冷却与播报频次控制机制抑制频繁告警。基于 STM32F103C8 平台搭建验证原型, 集成超声波测距、GNSS 定位与网络导航功能。通过多组实测验证, 该策略可在有限算力下保障近身安全反馈的优先级, 危险场景下振动反馈平均延迟仅 0.127s。在测试条件下, 近障语音抢占成功率为 100% (10/10), 在调度层面有效规避了导航信息覆盖安全提示的风险, 可为嵌入式助残设备的实时交互设计提供参考。

关键词: 实时抢占调度; 嵌入式系统; 视障辅助; 任务优先级; 超声波测距

Design and Verification of an Embedded Real-Time Preemptive Scheduling Strategy for Visually Impaired Assistance

Zhao Jinghui, Wang Huajun*, Dai Linlin

Wuxi Taihu University, China Jiangsu Wuxi 214064

Abstract: Aiming at the scheduling conflict that navigation voice tasks may override obstacle avoidance warnings when multiple tasks run concurrently on resource-constrained embedded visual impairment assistance devices, this study proposes an embedded real-time preemptive scheduling strategy for visually impaired travel scenarios. Under the bare-metal framework without an operating system, the strategy sets the near-obstacle tactile feedback task as the highest priority, supports unconditional preemption of navigation broadcast tasks by safety events, and suppresses frequent alarms with a hierarchical voice cooling and broadcast frequency control mechanism. A verification prototype is built based on the STM32F103C8 platform, integrating ultrasonic ranging, GNSS positioning and network navigation functions, and the scheduling performance is verified through multiple groups of actual measurements. The results show that the strategy can guarantee the absolute priority of proximity safety feedback under limited computing power. The average delay of vibration feedback in dangerous scenarios is only 0.127s, and the near-obstacle voice preemption success rate reaches 100% (10/10) under test conditions, which effectively avoids the risk of navigation information overriding safety prompts at the scheduling level, and can provide a reference for the real-time interaction design of embedded assistive devices for the disabled.

Keywords: Real-time preemptive scheduling; Embedded systems; Visual impairment assistance; Task priority; Ultrasonic ranging

0 引言

嵌入式助残设备的主要目标是为特殊群体提供稳定、及时的环境反馈, 但视障人士的户外出行场景对系统实时性有不同严苛程度的要求。近身避障属于安全级任务, 要求极低的响应时延; 而路线导航属于信息级任务, 可按固定周期更新。然而, 在低成本嵌入式平台中, 受限于计算资源、外设接口与输出通道的约束, 多任务并发时极易出现时序冲突。例如当语音导航正在播报路线信息时, 若突发近距离障碍告警, 安全提示可能被正在执行的语音任务覆盖, 形成使用风险。

现有智能导盲^[1-6] 相关研究多侧重于传感器选型与功能叠加, 对资源受限场景下的任务调度机制关注不足。部分方案采用实时操作系统可以实现优先级调度, 但其本身会占用额外存储与算力资源。而原型多采用简单轮询架构, 缺乏明确的优先级界定, 难以在调度算法层面保障安全反馈的时效性。因此, 低成本嵌入式方案的实时调度设计仍是当前研究的薄弱环节。

鉴于此, 本研究提出一种基于裸机主循环的轻量实时抢占调度策略。该策略通过任务分级、近障抢占和分级语音冷却三层机制, 在 STM32F103C8 上实现安全任务

绝对优先、导航任务按需执行，为同类系统提供可复用框架。

1 系统实时调度需求分析

1.1 视障辅助场景的任务时序冲突

视障辅助终端的核心任务可分为三类：感知类任务包含超声波测距、GNSS 定位数据接收，以周期性方式完成环境数据采集；安全反馈类任务涵盖振动告警、近障语音提示，由外部危险事件触发，具备高优先级；信息服务类任务拆分两类执行逻辑，路径规划请求按固定周期发起，导航语音播报则需满足定位、网络、路径数据全部就绪的条件后触发。

多任务并发易引发两类时序冲突。一方面，语音合成作为串行独占资源。若导航播报期间触发障碍告警，安全提示将因通道被占而持续阻塞；另一方面，阻塞式超声测距长期占用主循环，推高其他任务响应抖动。传统轮询架构按固定顺序遍历任务，无法依据紧急程度动态调整，难以满足安全类任务的低时延约束。

1.2 资源受限平台的调度约束

本设计选用 STM32F103C8（Cortex-M3 内核）作为主控，片内配备 3 路 USART、多路定时器及通用 GPIO，但 Flash 与 RAM 仅各为 64 KB 和 20 KB，属典型资源受限平台。面向该硬件设计调度机制时，首先不引入大型 RTOS 以节省存储开销；其次全部外设驱动采用非阻塞逻辑，避免单任务独占主循环；最后，调度控制层保持轻量模块化，以利后期调试与功能扩展。

综合上述硬件约束条件，本研究构建基于主循环配合定时器中断的裸机调度架构，依托软件优先级标识与抢占判定逻辑实现实时任务调度，无需加载操作系统内核，无额外内核资源开销，该类轻量化调度实现方案已在同类型嵌入式设备中验证可行。

2 分层抢占式调度策略设计

2.1 任务优先级划分机制

结合各项任务的安全影响程度与实时响应需求^[7-9]，系统任务可被划分为三个优先级等级，优先级由高到低设置如下。

安全级任务包含超声波测距采样、振动反馈控制及危险状态语音告警。这类任务直接关系使用者人身安全，具备最高调度权限，能够打断任意低优先级任务的运行。

系统级任务负责 GNSS 数据解析、网络数据接收以及目的地协议解析，是维持系统正常运行的基础功能，采用事件触发方式调度；优先级低于安全级任务、高于服务级

任务。

服务级任务处理高德路径规划请求与导航语音播报，属于辅助信息服务任务，按照固定周期循环执行，运行期间可被更高优先级任务随时抢占。

系统采用主循环内的状态标志完成优先级判别。当检测到安全类触发事件时，系统即时置位高优先级标志，主循环中断当前正在运行的服务级任务，优先调度安全相关业务；安全任务处理完成后，系统恢复执行被暂停的低优先级任务。该分层抢占调度架构契合嵌入式实时系统设计规范，可保障关键安全任务具备稳定、可预测的执行时序。

2.2 近障无条件抢占逻辑

为实现近距离障碍物告警对导航语音任务的优先级抢占，设计了对应的软件调度逻辑。由于 SYN6288 语音模块为串行顺序执行设备，硬件不支持播报中途中断，本研究采用指令截断结合标志位判断的方式实现抢占控制。系统在每次导航语音播报前检测近障告警标志，若存在有效近障事件，则舍弃待播报导航指令，优先执行安全告警语音；若导航播报指令尚未发送完毕时触发近障预警，系统将停止向语音模块发送后续指令，并清空串口发送缓冲区，快速切换至告警语音输出。与此同时，振动反馈任务独立于语音通道运行，触发后可直接更新 PWM 占空比，无需等待其他任务结束。该机制实现了触觉反馈、安全语音、导航语音的逐级优先级排布，有效避免了安全提示被常规导航语音覆盖的问题，保障了近障预警的实时性与有效性。

2.3 分级冷却机制抑制重复告警

为避免障碍物频繁触发造成语音重复告警、干扰正常使用，本研究提出分级语音冷却与播报频次控制机制，依据障碍物距离对语音播报频次进行差异化约束。当障碍物距离小于 50cm 危险区间时，系统不设置冷却时间，测距更新即可触发语音告警，保证高危场景的告警实时性；距离处于 50cm ~ 100cm 警告区间时，设置 3s 冷却周期，冷却阶段仅更新振动反馈、屏蔽重复语音，待冷却结束且险情仍存在时再次告警。导航语音仅在无近障风险的空闲周期播报，播报过程中若检测到近障事件将被即时抢占。该机制在保障危险场景告警强度的同时，抑制了常规场景的语音冗余输出，有效优化了系统交互效果。

3 调度策略的硬件与固件实现

3.1 硬件平台的资源分配

为支撑调度策略的落地，为各外设分配独立的硬件资源，避免资源复用带来的调度冲突，具体接口分配见表 1。

表 1 核心外设硬件资源分配

模块类型	器件型号	占用 STM32 资源	功能说明
测距模块	HC-SR04	PB12 (Trig)、PB13 (Echo)、TIM3	近距离障碍检测，1MHz 计时基准
反馈模块	振动马达	PB6、TIM4_CH1	PWM 分级振动反馈，安全级输出
语音模块	SYN6288	USART3 (PB10/PB11)	语音合成播报，支持指令截断
定位模块	ATGM336H-5N	USART2 (PA2/PA3)	GNSS 定位数据接收，系统级输入
联网模块	ESP8266-01S	USART1 (PA9/PA10)	网络通信与导航请求，服务级链路

所有串口均采用中断接收与环形缓冲区相结合的驱动方式，数据接收不阻塞主循环，保障调度逻辑的流畅执行。超声波模块的测距原理与驱动设计参考了同类盲杖避障系统的成熟方案，保障感知链路的稳定性。

3.2 主循环调度框架实现

固件采用分层架构设计，分为 Hardware 外设驱动层与 Application 应用逻辑层，主循环周期设定为 50ms，各任务按优先级与触发条件调度执行，主循环任务调度参数见表 2。

表 2 主循环任务调度参数表

任务名称	优先级	触发条件	核心处理动作
超声波测距	安全级	每 200ms 周期触发	非阻塞式测距、滑动滤波、距离分级、振动占空比更新
近障语音告警	安全级	危险档立即触发；警告档 3s 冷却后触发	截断当前语音，发送告警语音帧
GNSS 数据解析	系统级	USART2 收到完整 NMEA 语句	解析经纬度、定位质量标志，更新定位状态
目的地协议解析	系统级	串口检测到 @DEST 数据帧	解析目标点坐标，开启导航状态
导航路径请求	服务级	每 20s 周期，且定位、网络、目的地均有效	发起高德坐标转换与步行路径规划请求
导航语音播报	服务级	路径请求完成，且无近障告警	发送导航下一步提示语音

主循环的执行流程为：先处理所有系统级事件，再执行周期性测距任务，若测距结果触发近障告警，则优先处理安全级反馈，最后在无安全事件的空闲窗口执行服务级导航任务。裸机环境下的多任务调度框架已在嵌入式场景中得到广泛应用，可兼顾实时性与代码简洁性。

3.3 外设驱动非阻塞优化方案

单一外设任务长时间占用主循环，会导致系统响应阻塞。为此，本研究对所有外设驱动进行了非阻塞优化设计。首先，在超声波测距模块增设 30ms 超时机制，当 Echo 引脚无回波信号时，会自动退出检测流程，从而避免程序卡

死。同时，搭配五点滑动平均滤波算法，可有效削弱测距异常值带来的检测误差。其次，系统串口通信采用中断接收结合环形缓冲区的工作模式，在中断内完成数据接收处理。主循环仅读取缓冲区完整数据帧，无需被动等待串口输入。最后，处理 ESP8266 网络请求时，采用异步发送与轮询接收结合的方式。发送请求后，主循环可并行执行其他任务，通过定期检索缓冲区获取网络响应数据，从而避免网络延时造成的任务阻塞。该非阻塞驱动架构可为系统抢占调度提供基础支撑，保证主循环可及时响应各类高优先级安全事件。

4 实验验证与性能分析

4.1 测试环境与指标设定

为验证调度策略的有效性与稳定性，搭建完整硬件原型进行实测，测试分为两个维度：一是基础感知模块的精度验证，确保调度策略的输入源可靠；二是调度抢占性能测试，核心验证近障任务的响应时延与抢占成功率。

测试环境：室内静态测距采用固定挡板作为目标；室外定位与整机测试在开阔无遮挡区域进行；网络测试采用手机热点提供公网连接；抢占时延采用 30fps 视频帧差法进行统计。

4.2 基础感知模块精度验证

为验证感知模块输出可靠性，分别开展超声测距精度测试与分级振动反馈标定试验。

超声测距试验选取 20 cm、50 cm、100 cm 三组典型距离各重复测量 10 次，全部样本均可获取有效回波，三组平均绝对误差为 2.1 mm、5.3 mm、9.5 mm。最大误差 15 mm，误差范围匹配低成本超声传感器性能，测距精度与同类方案保持一致。

分级振动反馈标定试验采用障碍物梯度趋近测试方案，障碍物由 180 cm 匀速趋近设备，经 10 组重复试验。统计结果表明，提示、警告、危险三档切换距离均值分别为 180.46 cm、100.54 cm、49.93 cm，与预设阈值相对偏差均小于 1%；三级振动输出对应的 PWM 平均占空比依次为 35.05%、64.33%、94.22%，危险档位振动刺激可被人体感知，验证了分层触觉反馈机制的分级输出性能。

4.3 调度抢占性能实测分析

调度性能的核心测试指标为近障触发后的反馈时延与抢占成功率，共进行 10 次重复测试，统计结果如下：

（1）触觉反馈时延：从障碍物进入 50cm 危险范围到振动马达启动，平均延迟 0.127s，最大延迟 0.167s，均低于 200ms，满足近身避障的实时性要求。

(2) 语音反馈时延: 危险档语音告警平均延迟 0.413s, 最大延迟 0.500s, 所有测试中告警语音均成功打断导航语音, 近障语音抢占率达 100%, 验证了无条件抢占机制的有效性。

(3) 导航任务稳定性: 在无近障的常规场景下, 导航路径请求按 20s 周期稳定执行, 未出现因高优先级任务频繁打断导致的导航功能失效, 调度策略兼顾了安全优先级与服务功能的可用性。

4.4 调度策略稳定性讨论

连续 2 小时开机测试结果显示, 系统未出现主循环卡死、任务调度紊乱的情况, 测距、定位、导航功能均稳定运行。该调度策略结构简洁、执行路径确定, 适合资源受限平台, 无需 RTOS 的复杂任务切换开销, 非常适合 STM32F103 这类资源受限的单片机平台。

当前调度策略仍存在可优化空间: 一是当前仅实现安全级任务对服务级任务的单向抢占, 后续可细化任务优先级, 支持更多层级的任务调度; 二是当前抢占仅针对语音输出通道, 后续可扩展网络、定位等任务的优先级动态调整机制, 进一步提升系统实时性能。

5 结语

针对低成本嵌入式视障辅助设备中的任务时序冲突问题, 本研究提出了一种轻量型实时抢占调度策略。该策略基于裸机主循环架构, 通过三级任务优先级划分、近障无条件抢占与分级语音冷却机制, 能在有限算力资源下实现安全任务的绝对优先级保障。实测结果验证, 该策略可实现危险场景下 0.2s 内的触觉反馈, 近障语音抢占率达 100%, 在调度层面有效规避了导航语音覆盖安全提示的风险。

本研究提出的调度框架无需引入实时操作系统, 代码结构清晰、可移植性强。不仅适用于视障辅助设备, 也可作为各类资源受限以及对安全实时性有要求的嵌入式系统提供设计参考。后续将进一步优化调度粒度, 引入动态优先

级调整机制, 提升复杂场景下的调度适应性。

参考文献:

- [1] 王玥. 面向视障人士无障碍出行智能产品设计研究[D]. 河北工业大学, 2023.DOI:10.27105/d.cnki.ghbgu.2023.000527.
 - [2] 赵舒欣. 基于 SLAM 技术在视障人群视觉辅助领域应用研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2021(9):157-159.DOI:10.16184/j.cnki.comprg.2021.09.061.
 - [3] 张徐东, 罗桂生, 谢佳能等. 基于 STM32 的多模态语音导航智能导盲杖[J]. 物联网技术, 2026,16(8):54-57+61.
 - [4] 梁章恒, 高天睿, 张悠蕊等. 基于 AIoT 的智能导盲杖系统[J]. 物联网技术, 2026,16(7):75-77.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2026.07.017.
 - [5] 袁梓乔, 杨沙沙. 融合陀螺仪的导盲杖跌倒行为检测方法研究[J]. 无线互联科技, 2025,22(24):90-93.
 - [6] 边志鹏, 丛慧, 李智昆等. 基于 ChatGPT 的智能导盲杖设计[J]. 机械工程与自动化, 2025,54(5):107-108.
 - [7] 梁春令. 嵌入式系统中实时任务调度算法优化与性能评估[J]. 数字技术与应用, 2025,43(9):213-215.
 - [8] 严蕴涵. 任务调度开销感知的嵌入式实时操作系统实时性能分析[D]. 电子科技大学, 2025.DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2025.000075.
 - [9] 田文韬, 李晓明. 嵌入式测试平台的多 DAG 实时调度算法[J]. 集成电路与嵌入式系统, 2025,25(3):24-32.
- 基金项目: 本文由江苏省大学生创新项目“基于 STM32 的智能盲杖的设计与实现”资助, 项目编号为 202513571003。
- 作者简介: 赵景辉 (2004-), 男, 汉族, 山西晋中人, 本科, 学生, 研究方向: 嵌入式系统。
- * 通讯作者: 王华君 (1979-), 男, 汉族, 江苏宜兴人, 硕士, 教授, 研究方向: 计算机应用。