

基于端云协同的低成本智能盲杖硬件集成方案设计与验证

赵景辉 代林林 黄晨晨 于静怡 宋瑜婕

无锡太湖学院, 中国·江苏 无锡 214064

摘要: 针对现有智能导盲设备成本偏高、功能集成难度大等问题, 设计并验证一套基于端云协同的低成本智能盲杖硬件集成方案。该方案以 STM32F103C8 单片机为主控核心, 采用分层功能进行部署。首先将超声波避障、GNSS 定位等强实时、低算力功能部署于嵌入式终端, 其次将语音识别、POI 检索等人机交互与高算力任务迁移至 Android 手机端, 同时结合高德地图 Web 服务实现步行路径规划, 构建“终端感知-云端服务-手机交互”三级协同架构。测试结果表明, 该系统可在极低硬件成本下实现近身避障与卫星导航功能闭环; 坐标转换与路径规划单次完整请求平均总耗时 545.2ms, 在 5 组测试样本内定位与导航请求均成功响应, 定位、导航链路运行正常, 可为低成本视障辅助设备快速开发提供可复用集成参考。

关键词: 视障辅助终端; 智能盲杖; 端云协同; 硬件集成; 嵌入式导航; 高德地图服务

Design and Verification of a Low-Cost Hardware Integration Scheme for Intelligent Blind Canes Based on Edge-Cloud Collaboration

Zhao Jinghui, Dai Linlin, Huang Chenchen, Yu Jingyi, Song Yujie

Wuxi Taihu University, China Jiangsu Wuxi 214064

Abstract: Addressing the issues of high cost and difficulty in functional integration of existing intelligent guide devices for the visually impaired, a low-cost intelligent blind cane hardware integration scheme based on terminal-cloud collaboration is designed and verified. This scheme uses the STM32F103C8 microcontroller as the main control core and deploys functions in a hierarchical manner. Firstly, strong real-time and low-computational-power functions such as ultrasonic obstacle avoidance and GNSS positioning are deployed on the embedded terminal. Secondly, human-computer interaction and high-computational-power tasks such as speech recognition and POI retrieval are migrated to the Android mobile phone terminal. At the same time, the system integrates with the Web services of Gaode Map to achieve walking path planning, forming a three-level collaborative architecture of "terminal perception - cloud service - mobile phone interaction". Test results show that the system can achieve a closed loop of close-range obstacle avoidance and satellite navigation functions at extremely low hardware costs. The average total time for a single complete request of coordinate conversion and path planning is 545.2ms. In five sets of test samples, both positioning and navigation requests are successfully responded to, and the positioning and navigation links operate normally. This provides a reusable integration reference for the rapid development of low-cost assistive devices for the visually impaired.

Keywords: Visual impairment assistance terminal; Smart blind cane; Cloud-end collaboration; Hardware integration; Embedded navigation; Amap service

0 引言

现有高端智能导盲设备^[1-5]普遍搭载激光雷达与机器视觉方案, 整机成本普遍超千元, 难以规模化普及。市面简易电子盲杖虽然控制了成本, 但囿于单一传感器实现预警功能, 缺失定位导航能力, 适用场景受限。尽管商用地图 API 可有效规避自建路网数据库的高额研发投入, 但嵌入式终端算力、存储资源有限, 无法独立完成地图解析与复杂算法运算, 且端云数据交互难以兼顾实时性与资源

约束。

针对上述问题, 系统基于通用低成本嵌入式硬件模块搭建智能盲杖原型系统, 采用端云协同架构^[6-11]。该架构将强实时、低算力的感知与安全反馈功能部署于嵌入式终端, 将高算力交互任务迁移至手机端, 并借助云端地图服务提供导航数据支撑, 从而在有效控制硬件成本的同时实现完整的导盲功能。系统硬件均选用市面标准化通用器件, 软件采用分层模块化开发模式, 整体方案可复现性良好,

可为低成本助残智能设备的工程化开发提供有益参考。

1 系统总体架构与功能拆分

1.1 端云协同的设计思路

系统构建三级协同架构，依据任务实时性需求与设备算力差异分层部署功能，实现系统资源与任务负载的优化配置。整体架构分为终端感知层、云端服务层与移动端交互层。

终端层以 STM32 主控盲杖为核心，承担近距离障碍物检测、振动反馈、GNSS 定位解析、网络管控及语音播报等实时安全任务。为规避网络延迟带来的安全隐患，避障与触觉反馈闭环采用本地独立运行机制；其余低复杂度实时任务由单片机统一调度，保障系统稳定高效运行。

云服务层采用高德地图 Web 服务，提供坐标转换、步行路径规划、POI 检索等核心导航能力。系统复用商用地图成熟的路网数据与导航算法，规避了自研导航引擎的开发成本与技术门槛，通过标准化 HTTP 接口即可完成导航数据调用，工程可靠性强。

交互层基于 Android 移动端实现语音目的地录入、POI 结果展示与终端通信对接。将语音识别与人机交互任务部署于移动端，可依托成熟移动生态降低嵌入式端开发压力，同时贴合视障出行场景，优化人机交互适配性。

三层架构通过标准 HTTP 协议与轻量化 TCP 文本协议完成数据交互。各模块采用通用接口通信，无数据结构与内存耦合，单一模块迭代调整不会影响其余模块，有效提升系统的模块化程度与可拓展性。

1.2 功能模块的层级划分

系统从功能层面划分为障碍感知、定位、网络服务、人机交互与语音反馈五大模块，各模块的部署层级、核心能力与硬件载体如表 1 所示。

其中，终端层承载实时控制类任务，云端负责位置运算，移动端承担人机交互业务，各层级分工明确、协同工作，可在低成本硬件条件下完成从目的地录入到路径引导的完整导盲业务闭环。

2 硬件系统集成设计

2.1 主控与外设接口分配

主控选用 STM32F103C8 最小系统板，该芯片为嵌入式通用器件，外设资源可支撑全部外设接入，采购成本低廉。为规避外设资源冲突，各模块分配独立串口、GPIO 与定时器通道，引脚分配如表 2 所示。三个串口已全部分配给联网、定位、语音三类外设，剩余的 GPIO 与定时器资源分配给测距与振动反馈，避免了外设间的资源争用。

2.2 感知与反馈模块电路设计

超声波测距采用 HC-SR04，STM32 通过 GPIO 输出 15 μs 脉冲触发测距，Echo 高电平持续时间对应声波往返时长，距离计算公式：

$$d=0.17t \tag{1}$$

t 为 Echo 高电平时长（μs）， d 为障碍物距离（mm）。Echo 输出 5 V 电平经分压电路转换至 3.3 V 适配单片机 IO 口，TIM3 定时器提供 1 MHz 计数基准保障测距精度，同时采用五点滑动滤波算法抑制测距数据抖动，提升检测稳定性。

系统通过 TIM4_CH1 输出 PWM 信号驱动微型振动马达，采用 MOS 管低边驱动方式，规避单片机 IO 口直接带载损坏风险。设备设置三级避障阈值，对应三档差异化振动强度：101 ~ 180 cm 提示档、51 ~ 100 cm 警告档、≤ 50 cm 危险档，对应 PWM 占空比分别为 35.05%、64.33%、94.22%，档位梯度均匀、告警层次清晰。

语音反馈选用 SYN6288 中文语音合成模块，串口接

表 1 系统功能模块划分与部署层级

功能模块	部署层级	核心能力	实现载体
障碍感知模块	终端层	超声波测距、距离分级、振动反馈	HC-SR04、振动马达、STM32
定位模块	终端层	北斗 / GNSS信号接收、经纬度解析	ATGM336H-5N、STM32
网络服务模块	终端层 + 云服务层	HTTP请求封装、坐标转换、路径规划	ESP8266、高德Web API
人机交互模块	交互层	语音识别、POI搜索、目的地下发	Android App、高德POI API
语音反馈模块	终端层	告警与导航提示语音播报	SYN6288语音合成模块

表2 硬件接口与引脚分配表

外设模块	接口类型	STM32 引脚	通信参数
ESP8266-01S Wi-Fi模块	USART1	PA9（TX）、PA10（RX）	115200bps，AT指令控制
ATGM336H-5N定位模块	USART2	PA2（TX）、PA3（RX）	9600bps，NMEA-0183协议
SYN6288语音合成模块	USART3	PB10（TX）、PB11（RX）	9600bps，自定义帧协议
HC-SR04超声波模块	GPIO	PB12（Trig）、PB13（Echo）	GPIO输入输出，TIM3计时
振动马达	PWM	PB6（TIM4_CH1）	PWM占空比调节振动强度

收 0xFD 起始帧实现文本转语音。系统优先采用固定中文短句与数字播报, 固定短句播报虽牺牲了路线指引的逐句灵活性, 但规避了中文编码兼容风险, 导航的主要信息(距离和方向)通过数字和关键词完成传递。

3 端云协同功能实现

3.1 嵌入式端网络请求封装

嵌入式终端借助 ESP8266-01S 实现无线网络接入, 采用 AT 指令完成 Wi-Fi 配网、TCP 服务搭建以及 HTTP 请求发送。模块上电后依次完成配置工作模式、接入热点、开启多路连接并监听 9000 端口等任务, 才能接收移动端下发的导航指令。系统对网络请求做轻量化封装, 不依赖完整 TCP/IP 协议栈, 直接通过 AT 指令拼接 GET 报文异步访问云端接口, 数据交互不会打断测距、定位等实时任务, 保证整机时序稳定运行。

3.2 高德 Web 服务的接口适配

终端适配高德 Web 服务两类核心接口, 完成导航数据校准与求解。设备 GNSS 输出 WGS84 坐标系数据, 与高德 GCJ-02 坐标系不兼容, 通过坐标转换接口完成坐标标准化校正, 接口入参包含原始坐标、坐标系标识与开发者密钥。路径规划接口以实时定位坐标为起点、用户目的地为终点, 返回 JSON 格式路径数据。针对 STM32F103C8 仅 20 KB 片内 SRAM 限制, 系统采用状态机逐字符解析报文, 仅提取导航文本与距离字段, 把解析占用内存从 8 KB 以上降至 1 KB 内, 避免内存溢出。Android 端对接 POI 检索接口, 通过关键词查询地点数据并解析展示, 供用户选定目的地并下发导航指令。

3.3 Android 辅助端的交互协议

Android 端采用单 Activity 架构, 界面包含 Wi-Fi 参数配置、语音录入按钮、POI 候选列表与系统状态提示栏。语音识别调用系统自带 RecognizerIntent, 无需集成第三方语音 SDK。

系统通信链路采用非对称 TCP 架构, 以 Android 端为客户端、盲杖 ESP8266 模块为服务端。通信过程摒弃二进制序列化方式, 采用 UTF-8 明文指令集, 便于串口工具实时调试与报文解析。用户确认目标位置后, 移动端下发标准化指令帧: @DEST,<lng>,<lat>,<name>\r\n, 其中 lng、lat 为目的地经纬度坐标, name 为地点名称。

针对地名含逗号易造成解析错位的现象, 系统采用反向截取报文末尾字段的解析方案, 移动端同步替换地名内逗号为空格, 保障跨端报文解析稳定, 同时提升跨端通信可靠性。

4 系统集成测试与功能验证

4.1 测试方案设计

为验证系统硬件集成可靠性与端云导航稳定性, 依托整机硬件原型与手机热点网络环境, 从硬件模块功能、GNSS 定位性能、端云链路稳定性、方案适用性四个维度开展系统性测试, 全面核验系统性能与工程应用价值。

4.2 硬件模块功能测试

对系统核心外设进行分项功能测试。超声波测距设置 20 cm、50 cm、100 cm 三组梯度距离, 每组重复测试 10 次, 所有数据均有效。三组测距平均绝对误差分别为 2.1 mm、5.3 mm、9.5 mm, 最大误差 15 mm, 满足近距离避障精度要求。五点滤波算法可有效抑制数据抖动, 测距性能与同类嵌入式方案持平^[7]。

障碍物远近递进测试结果表明, 设备三档避障触发平均距离为 180.46 cm、100.54 cm、49.93 cm, 档位切换偏差小于 1 cm, 处于传感器固有误差范围; 各档位 PWM 占空比偏差低于 2%, 分级振动告警逻辑精准, 符合设计指标。

语音模块可稳定播报导航与距离信息, 危险告警指令具备优先播报权限, 可即时中断常规导航语音。Wi-Fi 通信测试证实, ESP8266 可稳定联网建链, 与 Android 终端 TCP 数据交互无丢包、断连问题, 通信可靠性良好。

4.3 端云导航链路性能测试

室外开阔区域定点测试结果显示, 系统冷热启动各 5 次测试成功率 100%。冷启动平均定位时长 45.48 s, 热启动 13.16 s; 冷热启动平均 HDOP 分别为 1.414、1.014, 定位精度可满足步行导航需求, 性能与主流导盲终端基本一致。

高德接口链路测试共完成 5 组全流程请求, 调用成功率 100%。全链路单次平均耗时 545.2 ms, 其中坐标转换 102.2 ms、路径规划 443.0 ms, 仅占 20 s 导航更新周期的 2.7%, 时序余量充足, 可实现稳定周期性路径刷新。

系统配备完善网络容错机制, 设置 2 s 单次超时阈值与 3 次自动重试机制, 联网持续异常时自动播报故障提示, 并降级为本地超声波避障模式, 保障基础出行安全。整机联调证实, 语音输入、指令下发、路径规划、语音播报的全业务流程运行稳定、功能闭环。

4.4 方案对比与适用性分析

针对现有视障辅助方案普遍存在成本与功能失衡问题, 本系统采用低成本模块化硬件与端云协同架构, 有效兼顾设备造价与导航、避障综合性能, 多维度对比结果如表 3 所示。

表3 不同辅助出行方案对比

方案类型	核心优势	主要不足	本系统优化点
传统白杖	低成本、高可靠、无需供电	感知距离短，无导航能力	保留手持形态，新增振动反馈与导航功能
单超声波电子盲杖	结构简单、成本低、易实现	仅能测距，无定位导航功能	新增GNSS定位与云导航，扩展信息维度
纯手机导航方案	地图服务成熟、交互便捷	无法感知近身障碍，手持不便	手机负责交互，盲杖负责安全感知，功能互补
视觉识别导盲设备	语义信息丰富、识别能力强	算力要求高、成本高、功耗大	采用通用模块，成本极低，适合教学复现

5 结语

本文设计并验证了一套基于端云协同的低成本智能盲杖硬件集成方案。该方案采用“终端－云－手机”三级分层架构，借助嵌入式器件搭建硬件平台，然后通过任务分层拆分突破单片机算力与资源限制，实现超声波避障、GNSS 定位、云端路径规划与语音交互的完整功能闭环。实测结果表明，各硬件模块工作稳定，测距精度满足近距离避障需求，端云导航链路通信可靠，网络异常降级机制可有效保障基础出行防护能力，核心软件交互逻辑运行稳定。系统硬件通用性强、软件模块化程度高，可移植性与工程实用性良好，可为低成本助残智能设备轻量化开发与工程落地提供技术参考。后续将优化低功耗管理策略，拓展多传感器融合、远程求助等功能，进一步提升设备场景适配能力与实用价值。

参考文献：

[1] 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.

[2] 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.

[3] 仲道阳，孙玉，汪菊等. 基于端云协同和多模态感知推理的城市路侧 POI 自动采集方法[J]. 地球信息科学学报，2026, 28(4): 1089-1105.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 杨勉，吕杰，杨文瑞等. 云端协同下智慧文旅夜游系统设计与应用研究[J]. 电脑编程技巧与维护，2026(6): 10-12.

[7] 董超，经宇骞，尤嘉豪等. 低空协同智能体系架构与关键技术[J/OL]. 航空学报，1-29[2026-07-20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20260623.1959.004>.

[8] 于信鑫，金向阳. 室内移动机器人自主定位导航系统设计[J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学版)，2026, 42(3): 306-312.

[9] 张艳玲，刘文彦，孙良庆等. 基于端云协同建筑全生命周期碳排放核算系统设计与实现[J/OL]. 山东建筑大学学报，1-13[2026-07-20].<https://link.cnki.net/urlid/37.1449.tu.20260530.1337.002>.

[10] 朱明哲，胡懋地. 本地优先与端云协同：基于 OpenClaw 的 AI 智能体部署范式重构与治理[J/OL]. 科学观察，1-16[2026-07-20].<https://doi.org/10.15978/j.cnki.1673-5668.20260418>.

[11] 孙竹梅，冯柳丽，代翊尧. 基于端云协同架构的室内温湿度调控系统设计[J]. 自动化与仪表，2026, 41(4): 10-14.

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。