

基于车路协同技术与 UWB 定位技术的盲人过街辅助装置研究

黎帅, 叶琦, 毛帅文, 宋晨城, 孔羿翔
东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040
DOI: 10.61369/TACS.2025050006

摘 要 : 针对视障行人过街时面临的车辆碰撞风险高、交通信号感知难等问题, 本文设计了一套基于车路协同技术的辅助系统。该系统依托现有车路协同路侧设备的车辆检测 (位置、速度) 与交通信号灯感知能力, 通过轻量化改造实现与视障端主机的协同交互。视障端采用套把式圆柱结构设计, 集成 UWB 定位模块、IMU 传感器、蓝牙通信模块及 STM32 主控单元, 通过卡尔曼滤波算法融合多源数据以获取精准位置与运动状态, 并基于预设规则生成振动与语音多模态预警; 路侧端新增 UWB 基站适配功能, 定向转发核心环境数据; 车载端则响应预警信号实现声光提示与辅助制动。系统可实现厘米级定位精度, 端到端响应延迟低于 100ms, 能有效降低视障行人过街风险, 为无障碍交通环境建设提供技术支撑。

关 键 词 : 车路协同技术; UWB 定位技术; 视障人群; 过街辅助装置; 智能预警系统

Research on Blind Pedestrian Crossing Assistance Device Based on Vehicle Road Cooperation Technology and UWB Positioning Technology

Li Shuai, Ye Qi, Mao Shuaiwen, Song Chencheng, Kong Yixiang
School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040

Abstract : Addressing the high risk of vehicle collisions and difficulties in perceiving traffic signals faced by visually impaired pedestrians when crossing the street, this paper designs an assistance system based on vehicle-road collaboration technology. The system leverages the vehicle detection (location, speed) and traffic signal perception capabilities of existing vehicle-road collaboration roadside equipment, achieving collaborative interaction with the visually impaired terminal host through lightweight modifications. The visually impaired terminal adopts a cylindrical structure design, integrating UWB positioning modules, IMU sensors, Bluetooth communication modules, and STM32 control units. It uses Kalman filter algorithms to fuse multi-source data to obtain precise location and motion status, and generates multi-modal warnings based on pre-set rules, including vibration and voice alerts. The roadside terminal adds UWB base station adaptation functionality to forward core environmental data in a targeted manner. The vehicle-mounted end responds to warning signals to provide audio-visual alerts and assist with braking. The system achieves centimeter-level positioning accuracy with end-to-end response latency below 100ms, effectively reducing the risk of visually impaired pedestrians crossing the street and providing technical support for the construction of an accessible transportation environment.

Keywords : vehicle-road coordination technology; UWB positioning technology; visually impaired people; crosswalk assistance device; intelligent warning system

一、研究背景及意义

视障人群的出行安全是亟待解决的民生难题。世界卫生组织《世界视力报告》显示, 全球视障人群约 3.14 亿, 我国视障人群达 1700 万, 占总人口 1.2% 以上。该群体面临显著的出行限制: 平均每日出行次数不足普通人群的 1/3, 80% 活动范围局限于 500 米生活圈, 且过街场景事故伤亡率显著高于普通行人 —— 无信号灯路段因无法感知车辆动态易发生冲突, 信号灯路口因难以实时获取信号变化常导致误判^[1]。此外, 视障人群在使用智能手机时存在诸多困难, 这进一步加剧了他们的出行难题, 比如难以顺

畅操作导航软件获取实时路线信息等^[2]。同时, 当前对视障人群的预警或导航提示多依靠语言, 缺乏更多源的感知方法, 如振动, 这在嘈杂环境中容易影响信息传递的有效性^[3]。

现有辅助手段难以应对复杂交通环境: 一方面, 传统设施存在“静态指引”局限, 盲道易被占用或导向模糊^[4], 过街音响仅能提供固定信号提示, 无法传递车辆轨迹等动态信息^[5]; 另一方面, 现有单一技术设备如超声波导盲系统、机器视觉导盲杖、斑马线识别系统虽能解决局部问题, 但受限于感知范围与环境适应性, 无法实现全域风险预警^[6-8]。王冠生等在综述中也指出, 现有导盲辅具普遍缺乏多源数据融合能力, 难以应对复杂路口的动态

风险^[9]。

近年来，车路协同、高精度定位等智能交通技术快速发展，已实现交通数据实时共享，为提升交通安全性提供了技术支撑^[10]。但现有应用多聚焦普通交通参与者，针对视障人群的“人-车-路”协同体系存在明显缺口：既缺乏将车路协同数据与视障人群多模态交互需求融合的技术架构，也未形成动态风险预判与双向预警的闭环机制。这种技术进步与特殊群体需求的脱节，使得视障人群难以享受智能交通红利。但同时，如 UWB 定位技术在视障人群导盲方面已展现出优越性^[11]，故可通过整合车路协同与 UWB 定位技术，让视障人群能够切实享受到智能交通发展带来的安全与便利。

二、装置结构设计及功能

针对视障行人过街的环境感知与安全预警需求，设计轻量化、低功耗的全域主动保护装置，融合车路协同环境感知能力与 UWB 厘米级定位优势，构建“高精度定位+动态风险预警”系统。

（一）视障端结构设计及硬件功能

视障端各硬件集成为一主机与骨传导耳机，其中主机设计为一种适配于大部分普通导盲杖的外置套把（可拆卸），骨传导耳机外形与市面上大部分骨传导耳机类似，内置与主机之间的无线通讯模块，用于实现视障端的精确定位以及多模态预警功能，大致外观如图1、图2所示。

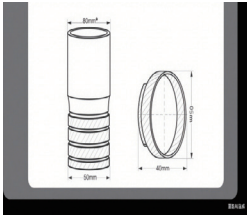


图1 套把式主机外观

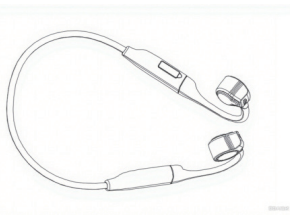


图2 骨传导耳机

其中，套把式主机整体为直径 40mm 的圆柱体，分上下两部分：上部为 80mm 长的模块安置区，中央设 STM32 主控单元，左上方通过 SPI 线连接 UWB 定位模块，左下方经 I²C 线接 IMU 九轴传感器，右下方以 UART 线连 BW16 蓝牙模块，内壁两侧对称分布振动马达并通过 GPIO 线与主控相连，各模块沿内壁凹槽排线；下部为 50mm 长的空心连接区，内壁带 3 道环形防滑纹（间距 10mm），适配直径 18-25mm 的导盲杖，上下部分通过环形凹槽分隔，整体结构紧凑且兼顾模块防护与握持舒适度。

各模块功能方面，由 UWB 模块实现厘米级定位，IMU 感知步行姿态与运动状态，BW16 蓝牙模块接收路侧动态信息，STM32 主控融合数据生成预警决策，交互模块通过振动提示危险方向、语音播报预警指令，协同为视障行人提供过街安全指引，运作流程如图3所示。



图3 运作流程图

（二）路侧端各硬件设计及功能

基于现成熟车辆协同路框架，路侧端采用“感知-处理-通信”三层模块化架构，核心硬件包括 UWB 定位基站、毫米波雷达、轻量图像识别摄像头、树莓派 4B 处理单元及双模通信模块。其中，UWB 基站实现视障行人厘米级定位，毫米波雷达实时捕捉 50 米内车辆的位置与速度，摄像头专注识别交通信号灯状态；树莓派 4B 作为主控，通过时间戳同步多源数据，运行轻量化算法生成结构化信息，再经蓝牙 BLE（短距 10-100m）向视障端推送车辆位置、信号灯状态等预警、C-V2X 模块（长距 200-500m）向车载端广播行人动态，形成环境感知与信息分发的核心枢纽，其协同逻辑如图4所示。

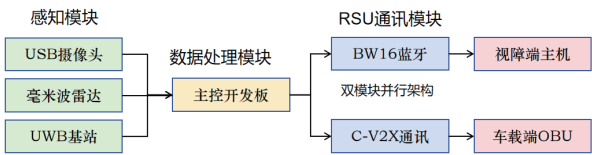


图4 协同逻辑图

（三）车载端各硬件设计及功能

复用现有车路协同车载单元（OBU），新增视障行人预警功能，依托车辆现有智能网联架构，通过 C-V2X 车载单元（OBU）接收路侧端推送的视障行人位置、轨迹及路口信号等数据，结合 CAN 总线获取的本车速度、转向角等参数，经内置算法判定碰撞风险等级（提示/警告/紧急），再通过中控屏显示与语音播报实现分级预警——提示级以图标闪烁与短音提醒，在不干扰驾驶的前提下构建多层防护，其核心运作流程如图5所示。

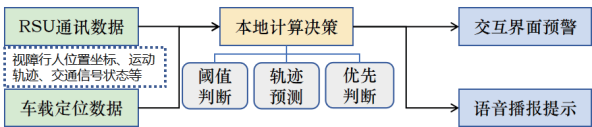


图5 车载端核心运作流程图

三、软件系统设计

（一）视障端软件设计

核心功能：实现多源数据融合与多模态预警。通过 SPI/I²C 接口实时采集 UWB 定位数据与 IMU 运动数据，经 STM32 主控进行时间戳对齐与卡尔曼滤波降噪；通过蓝牙接收路侧端转发的车辆动态与信号灯状态，基于预设安全规则生成风险等级；最终通过 GPIO 控制振动马达与音频模块输出多模态提示，采样率随运动状态动态切换，设计框架如图6所示。

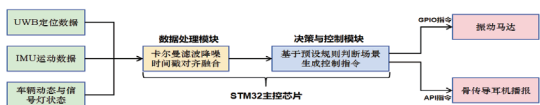


图6 视障端软件设计框架图

（二）路侧端软件设计

核心功能：实现数据中转与风险预判。摄像头通过 YOLOv5s 定位信号灯区域，结合 HSV 阈值分割识别红/黄/绿相位及 OCR 提取倒计时；UWB 基站以 TDOA 算法与滑动窗口滤波输

出视障行人厘米级坐标；毫米波雷达经 DBSCAN 聚类与多普勒效应分析获取车辆状态。多源数据时空对齐后，通过 EKF 融合与 TTC 筛选高风险信息，封装为轻量化协议帧定向推送，延迟 < 50ms，实现高效协同，框架图如图 7 所示。

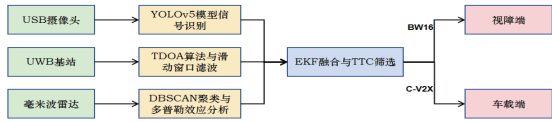


图 7 路侧端软件设计框架图

（三）车载端软件

核心功能：实现预警响应与辅助制动。通过车路协同通信接口接收路侧端的视障用户位置与风险预警；在现有 ADAS 系统基础上新增“弱势道路使用者”响应模块，当检测到视障用户进入车辆预警范围，优先触发声光报警，若车速 > 30km/h 且 $TTC < 2s$ ，激活轻度制动，直至风险解除。

四、预警方案设计

（一）车载端提示及预警方案

车载端通过人机交互界面以及语音播报对驾驶员进行提示及预警，同时根据不同风险等级设计梯度化预警方案，由视障行人与车辆的距离、相对速度、运动方向夹角综合判断，将预警方案分为提示级（一级）、警告级（二级）、紧急级（三级），从而匹配驾驶员从“注意”到“立即行动”的反应链路。预警方案如表 1 所示，各级预警等级示意图如图 8、图 9、图 10 所示。

表 1 车载端预警方案表

预警等级	触发条件	视觉反馈	语音反馈
一级提示	距离 50-30 米，且相对速度 10-20km/h，或运动方向夹角 $> 60^\circ$	黄色行人图标 + 黄色热力图，界面无闪烁，顶部预警等级显示区黄色高亮。	语音：“前方检测到视障行人，距离 X 米，请注意观察”。
二级警告	距离 30-15 米，或相对速度 20-30km/h，或运动方向夹角 $45^\circ - 60^\circ$	橙色行人图标闪烁 + 橙色热力图，预警等级显示区橙色闪烁，信息栏文字加粗。	语音：“警告！视障行人接近，距离 X，请减速！”
三级紧急	距离 < 15 米，或相对速度 $> 30km/h$ ，或运动方向夹角 $< 45^\circ$	红色行人图标爆闪（3 次/s）+ 全屏红色遮罩，信息栏红色背景白字。	语音：“紧急！视障行人危险距离！立即刹车！立即刹车！”



图 8 一级提示示意图



图 9 二级警告示意图



图 10 三级紧急示意图

（二）视障行人过街提示方案

当视障行人行至过街路口一定范围内，骨传导耳机提示视障行人相应路口方位及方向，如“前方 5m 有过街路口，左侧前往

XX 街道，直走前往 xx 街道”，同时播报交通信号灯实时状态，如“当前红绿灯为红灯，剩余 6s，请等待”。

视障行人过街预警方案分为车辆接近分级预警与特殊场景预警，基于 UWB 定位数据（行人 - 车辆距离）、IMU 运动数据（步行速度与方向）及路侧端传输的车辆轨迹数据，车辆接近分级预警分为三级预警，预警规则如表 2 所示；特殊场景预警方案如表 3 所示。若无危险情况存在或危险解除则播报“过街环境安全，可正常通行”，“人 - 车 - 路”三端交互场景如图 11 所示。

表 2 车辆接近分级预警方案表

预警等级	触发条件	触觉反馈	听觉反馈
一级提示	距离 50-30 米，且相对速度 10-20km/h，或运动方向夹角 $> 60^\circ$	单侧低频振动（1 次/秒），持续至风险解除。	语音：“注意！左侧 / 右侧 X 米有车辆接近，请减速”，间隔 5 秒重复播报。
二级警告	距离 30-15 米，或相对速度 20-30km/h，或运动方向夹角 $45^\circ - 60^\circ$	单侧中频振动（2 次/秒），伴随振动强度增强。	语音：“警告！车辆快速接近，距离 X 米，立即停下！”，间隔 3 秒重复播报，语音音量提高。
三级紧急	距离 < 15 米，或相对速度 $> 30km/h$ ，或运动方向夹角 $< 45^\circ$	左右两侧高频同步振动（5 次/秒），持续强震。	语音：“紧急！危险距离！立即停止移动！向左 / 右快速避让！”，语音高频蜂鸣叠加播报，直至风险解除。

表 3 特殊场景预警方案表

场景	触发条件	预警方案
静止状态下车辆接近	行人静止（IMU 检测速度 = 0），车辆距离 < 20 米且快速接近（速度 $> 25km/h$ ）。	双侧振动马达交替振动（左 → 右 → 左，3 次/秒），语音：“静止危险！车辆从左侧 / 右侧高速接近，请注意！”
信号冲突预警	路侧端数据显示绿灯状态但存在交叉方向车辆未礼让（如右转车辆抢行）。	单侧振动马达连续振动，语音：“注意！绿灯期间仍有车辆通行，请勿贸然过街！”

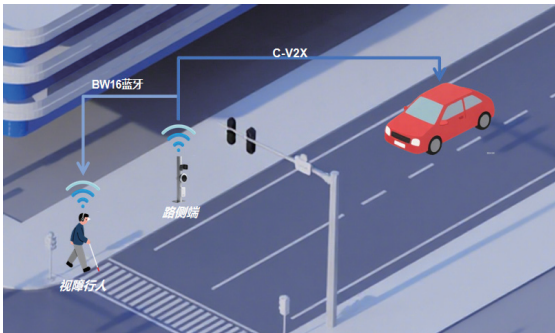


图 11 交互场景示意图

五、创新特色

1. 轻量化模块化设计，兼容现有导盲工具。主机采用可拆卸套把式结构，适配大部分普通导盲杖，无需改造原有设备，用户仅需加装低成本模块即可实现智能化升级；骨传导耳机通用化设计，兼顾日常使用与预警功能，降低使用门槛与成本。

2. “车路协同 + UWB 定位”技术融合。避免传统单点感知局限，通过路侧 UWB 基站、车载 C-V2X 模块与视障端设备联动，实现厘米级定位与全域环境感知，实时融合交通信号、车辆轨迹等动态数据，提前 50 米以上预警风险，解决传统设备仅依赖近距离避障、定位精度低的问题。

3. 多模态分级预警与动态决策。基于距离、速度、方向夹角三维度，将预警分为提示、警告、紧急三级，匹配不同风险等级的触觉与听觉反馈，如危险方向单侧振动 + 对应语音指令，避免“狼来了”效应，较传统单一提示更精准直观。

4. 全域覆盖的三端协同系统。构建“视障端 + 路侧端 + 车载端”闭环，整合 UWB 定位、毫米波雷达、交通信号等多源数据，通过蓝牙 / C-V2X 双模通信实现低延迟传输，覆盖城市主干道、无红绿灯路口等复杂场景，解决传统方案单一场景适配问题。

六、研究展望

本研究基于车路协同与 UWB 定位技术构建了视障行人过街辅助系统，初步实现了高精度定位与多模态预警，但在实际应用中仍有进一步优化和拓展的空间：

1. 场景适应性拓展。当前系统主要针对城市主干道与信号灯路口设计，未来可拓展至复杂场景，如无信号灯的小区路口、校园道路、施工路段等，通过融合激光雷达等更丰富的路侧感知设备，提升对突发障碍物的识别能力，实现全场景覆盖。

2. 技术融合深化。引入人工智能算法优化风险预判模型，结合视障行人历史出行轨迹与交通流规律，实现动态预警阈值自适应调整，减少误报与漏报；探索 UWB 与 5G 定位技术的融合应用，在遮挡严重的复杂环境中通过多源定位数据互补，进一步提升定位稳定性与抗干扰能力。

3. 用户体验优化。基于视障人群存在的个体差异，如出行频率、步行速度、对预警方式的敏感度等，开发个性化预警参数配置功能，通过语音交互实现“一人一策”的定制化服务；增强设备便携性与续航能力，例如采用柔性电池技术缩小主机体积，或通过太阳能辅助供电延长使用时间。

七、结束语

视障人群的出行安全是社会无障碍环境建设的重要体现，本研究通过轻量化改造现有车路协同设备，融合 UWB 厘米级定位与振动、语音多模态预警技术，构建起“视障端 - 路侧端 - 车载端”三端协同的过街辅助系统，有效弥补了传统辅助手段在定位精度、动态信息感知及预警方式上的不足，其厘米级定位、低延迟响应及轻量化低成本设计，不仅为视障行人提供了可感知的交通环境信息，提升了复杂场景下的信息传递效率，也降低了技术推广门槛，未来随着技术迭代与场景拓展，该系统有望进一步完善“人 - 车 - 路”协同的无障碍交通体系，让视障人群切实享受科技带来的出行自由，为包容性城市交通环境建设提供有力支撑。

参考文献

[1]Emerson Robert Wall, Kim Dae Shik, Naghshineh Koorosh. Effect of Artificial Alert Sound, Background Noise, and Vehicle Type on Detectability and Localizability of Quiet Cars by Blind Pedestrians [J]. ITE journal, 2015.

[2]李艳乔. 视障人群智能出行产品设计研究 [D]. 北方工业大学, 2024.DOI: 10.26926/d.cnki.gbfgu.2024.000853.

[3]葛一汉, 何晓佑. 基于振动触觉感知的视障人群导航设备设计 [J]. 工业设计, 2025, (02): 32-35.

[4]李慧. 面向视障群体的地铁出行导航设计应用研究 [D]. 沈阳航空航天大学, 2024.DOI: 10.27324/d.cnki.gshkc.2024.000065.

[5]江牧, 朱峰立. 视障人群出行公共设施设计研究 [J]. 创意与设计, 2018 (04): 45-50.

[6]鄢艳红. 基于单片机的简易超声波导盲系统设计 [J]. 科技与创新, 2024, (23): 39-41.

[7]高勇, 陈凯文, 张城, 等. 基于机器视觉的导盲杖设计 [J]. 河南科技, 2024, 51 (12): 24-29.

[8]曹玉珍, 刘刚, 杨海峰. 导盲系统中的道路斑马线识别方法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44 (15): 177-178.

[9]王冠生, 郑江华, 瓦哈甫·哈力克, 等. 盲人导航路径诱导辅具研究与应用综述 [J]. 计算机应用软件, 2012, 29 (12): 147-151.

[10]王培裴. 个案管理提升视障人士社会适应能力的研究 [D]. 青岛理工大学, 2024.

[11]李辰曦. 技术应许与社会支持：城市视障群体的数字融入研究 [D]. 湖北大学, 2024.