

基 ROS 与非接触式面部识别融合的“门前三小”便民服务体系研究

吴玲, 王周好, 高婷婷, 吴笃信, 黄佳武, 陈薇, 刘江燕, 崔昕怡, 雒志欣

黑龙江东方学院 信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150066

DOI: 10.61369/TACS.2026040048

摘 要 : 在这些年来, “门前三小”工程慢慢的形成了较为密集的基层服务点位网络, 在农村公共文化资源覆盖方面发挥了不小的正向作用。但是从实际运行情况来看, 行动不便群体所面临的“最后一百米”问题依旧没有被真正的解决, 还是有小瑕疵。尤其是在乡村老龄化不断加深的背景下, 传统依赖人工组织的“人到点”模式开始显现出明显压力, 不仅人力投入持续增加, 服务效率也难以进一步提升, 同时还存在参与门槛偏高的问题。基于此, 我们设计了一个“云端调度—ROS 移动执行—边缘感知”的闭环服务体系, 以攸县实际场景为例进行验证。系统在平台层通过微信小程序实现任务派发和资源调度; 车端集成 ROS Noetic 中间件, 采用 EKF 融合 ORB-SLAM3 与 Cartographer 多源 SLAM 框架, 地图分辨率 0.05 m, 并优化 YOLOv5s 目标检测和 MPPI 路径规划。识别评估层通过边缘计算部署 ArcFace 非接触式身份核验和 OpenPose+LSTM 动作编码, 实现数据本地化处理和隐私保护。基于攸县 816 个数字化点位的实地测试显示: SLAM 建图准确率达 98.7%, 自主导航避障成功率超过 95%; 与传统人工模式相比, 末端触达效率提升约 32.1%, 组织成本下降 28.0%, 关怀精准度提高 41.1%。该体系无需改变既有点位网络, 即可实现公共文化投递、便民跑腿和适老关怀的统一数据闭环, 为中西部地区数字乡村治理提供低成本、可复制的解决方案。

关 键 词 : 基层公共服务; 数字治理; ROS 生活服务机器人; 多源融合导航; 边缘计算; 非接触式动作编码; 适老化服务

Research on the “Three Small Services in Front of the Door” Convenience Service System Integrating ROS and Contactless Facial Recognition

Wu Ling, Wang Zhouhao, Gao Tingting, Wu Duxin, Huang Jiawu, Chen Wei, Liu Jiangyan, Cui Xinyi, Luo Zhixin

School of Information Engineering, Heilongjiang Oriental College, Harbin, Heilongjiang 150066

Abstract : The “Menqian Sanxiao” project has developed a dense network of grassroots service points, contributing significantly to rural cultural resource accessibility. However, the so-called “last 100 meters” accessibility barrier for mobility-limited populations remains a challenge. In response, we propose a closed-loop system integrating cloud-based scheduling, ROS mobile execution, and edge perception. The platform layer uses a WeChat mini-program for task assignment; the vehicle layer integrates ROS Noetic middleware with an EKF-fused ORB-SLAM3 and Cartographer multi-source SLAM framework (map resolution 0.05 m), optimized YOLOv5s object detection, and MPPI path planning. The perception layer deploys ArcFace contactless identity verification and OpenPose+LSTM action encoding on edge computing, ensuring privacy-compliant local data processing. Field tests across 816 digitized points in You County demonstrated SLAM mapping accuracy of 98.7% and autonomous navigation success rates above 95%. Compared with traditional manual approaches, terminal delivery efficiency increased by 32.1%, organizational costs decreased by 28.0%, and care precision improved by 41.1%. This system allows integration of public cultural delivery, convenient errands, and elderly care without altering existing point networks, providing a low-cost, replicable solution for digital rural governance in central and western China.

Keywords : Grassroots public services; digital governance; ROS life service robots; multi-source fusion navigation; edge computing; contactless motion coding; age-friendly services

引言

基层公共文化服务既是乡村振兴的重要组成部分, 也是推动乡村治理现代化的重要抓手。党的二十大报告明确提出, 要进一步健全现代公共文化服务体系, 并推动公共资源向农村地区持续下沉。在这一背景下, 湖南省攸县“门前三小”工程逐渐形成了较为典型的基

层公共服务模式。截至2024年底，全县已完成816个数字化点位建设，覆盖297个村级服务中心，服务半径缩短至300—500米，基本解决了传统乡村公共服务中“距离远、覆盖弱”的问题。

但需要看到的是，物理距离的缩短，并不代表服务已经真正做到“精准到人”。对于高龄老人、残障人士等行动能力较弱的群体而言，即便服务点已经下沉到村级空间，“最后一百米”仍然是最难跨过去的一环。现实中，很多线下活动依然高度依赖志愿者维持运行，人力消耗较大；与此同时，部分老年人对智能设备使用并不熟悉，也在一定程度上影响了数字平台的实际渗透效果。作者团队于2024年开展的1280份问卷调研显示，约85%的行动不便群体希望服务能够“送达家门口”，另有78%的老年受访者更倾向于简单、友好的适老化交互方式。可以看出，在乡村老龄化与基层劳动力不足的双重压力下，传统服务模式已经难以持续满足现实需求。

与此同时，目前市场上常见的商用服务机器人，大多面向室内或结构化环境设计，在乡村泥土路、坡道、弱网以及复杂光照等条件下，往往难以保持稳定运行。所以说，怎么去构建适配乡村复杂场景的低成本智能服务体系，慢慢的成为数字乡村建设中的非常重要的刚需问题。

基于此，本文以攸县“门前三小”工程为应用场景，提出“云端平台调度—ROS移动终端—边缘感知评估”一体化乡村便民服务体系。本文主要工作包括以下几个方面：首先，将ROS智能移动平台引入基层公共服务场景，使其成为高密度点位网络中的物理执行终端，实现公共文化、便民跑腿与适老关怀等业务的统一闭环；其次，构建EKF多源融合SLAM与轻量化YOLOv5s协同方案，以增强乡村复杂路况下的导航与感知能力；最后，在边缘端融合ArcFace与OpenPose+LSTM，实现隐私保护条件下的无感签到与行为关怀分析。

一、文献综述与理论基础

（一）基层公共文化服务的治理逻辑

从近年的研究趋势来看，基层公共文化服务已经不再只是单纯强调“建了多少点位”，而是越来越关注治理协同与实际触达效果。有学者提出，乡村中的微空间不仅承担文化传播功能，更在村庄认同、熟人关系维系以及基层治理互动中发挥着潜在作用。随着数字化建设推进，越来越多学者开始关注数字技术在基层治理中的嵌入方式，并指出资源下沉需要借助数字化路径缓解空间可达性问题。

湖南省“门前三小”实践在一定程度上实现了农村公共文化资源的广泛覆盖，但已有研究更多聚焦于其组织形式与文化传播价值，对于“最后一百米”精准触达问题的技术支撑研究相对不足。陈波、耿达基于27省147个行政村调查指出，在城镇化快速推进过程中，农村文化建设普遍面临空心化与形式化问题，其根源在于缺乏持续性的动力机制与基层协同体系。所以说，单单依靠固定点位建设，是不能够真正的去解决基层服务中的深层治理问题。

（二）ROS移动服务机器人的场景适配性

ROS目前已经成为机器人开发领域应用最广泛的平台之一，在室内导航、巡检以及物流配送等方向形成了相对成熟的技术体系。曾阳剑等基于ROS平台设计了多传感器融合巡检机器人，通过Gmapping建图、A全局规划以及改进DWA局部避障，实现了室内场景下较稳定的自主巡检。蔡明珠等则结合Cartographer、A与TEB算法构建移动机器人导航系统，在路径规划与定位精度方面取得了较好效果。

但需要指出的是，现有研究大多围绕结构化环境展开，对于乡村非结构化场景下的适配性研究仍然有限。就比如，农村泥土路面振动、低信号网络环境以及复杂天气变化，都会对机器人定位稳定性以及感知能力产生较大影响。换句话说，现有ROS系统

在乡村公共服务场景中的长期运行可靠性仍有待进一步验证。

（三）非接触式感知与适老化的工程应用

随着边缘计算与计算机视觉技术的发展，非接触式身份识别逐渐被应用于养老、医疗与公共服务等场景。RetinaFace、ArcFace等算法在复杂环境中的识别精度已得到验证，而基于姿态识别的人体行为分析技术，也开始用于跌倒检测、疲劳识别等领域。

不过，目前多数研究仍停留在实验室或单一场景测试阶段，对于县域尺度、多点位协同场景中的工程化部署与隐私治理机制讨论相对不足。尤其是在基层治理环境下，如何兼顾技术效率与居民隐私保护，仍然是实际落地过程中无法回避的问题。

（四）研究缺口与切入点

综合现有研究不难发现，当前基层公共服务数字化建设仍存在一些较为突出的短板。简单来说，一方面，公共服务平台、机器人执行系统以及感知识别模块之间尚未形成真正协同的闭环；另一方面，现有机器人系统对乡村复杂环境的适配能力仍然有限。此外，围绕老年群体展开的无感交互与关怀反馈机制，目前也还不够成熟。

因此，本文结合攸县816个真实点位的运行需求，尝试构建“平台调度—移动执行—无感感知”协同体系，以期为乡村基层公共服务提供一种更具落地性的技术方案。

二、攸县“门前三小”场景与服务需求剖析

（一）历史沿革与当前规模

攸县“门前三小”最早可追溯至2009年石羊塘镇谭家垅村高桥组夏昭炎教授创办的农家书屋。2017年底，该模式开始在全县范围推广，并于2018年3月全面铺开。2021年以后，原有“小书屋、小讲堂、小戏台”等内容进一步扩展，逐渐形成“门前十小”体系。随着数字化建设推进，2023—2025年间，当地逐步形

成“智慧门前三小”框架。

截至目前，全县已覆盖17个乡镇（街道）、297个村级服务中心，共建设816个数字化点位，并带动民间投入资金超过1.1亿元。服务半径由最初的3—5公里缩短至300—500米，基层群众在空间上的可达性明显提升。

在数字资源方面，平台注册用户已达到15.3万人，约占当地常住人口的25.5%。平台整合电子书超过10万册，精品课程2000余门，资源规模较数字化转型前增长超过10倍。同时，当地依托1769名“四老”志愿者，持续开展公益电影、戏曲下乡等活动，逐渐形成较稳定的基层治理基础。

（二）供需错配识别与多维环境约束

尽管“门前三小”已经形成高密度的点位覆盖，但在实际运行过程中，仍存在明显的供需错配现象。作者团队调研发现，当前体系主要面临以下几个方面的问题。

首先，当前体系在“最后一百米”触达方面依旧存在明显不足。对于高龄老人或残障人士而言，即便服务点已经较为接近，也并不意味着他们能够顺利参与相关活动。调研中，不少受访者都提到，相比“去点位”，他们更希望服务能够直接送到家门口。相关数据显示，约85%的行动不便群体持有这一观点。

其次，活动组织高度依赖人工。无论是签到、秩序维护还是物资搬运，目前依旧主要依靠志愿者完成，这不仅增加了组织成本，也导致服务稳定性较差。

此外，乡村场景本身具有明显的非结构化特征。泥土道路、复杂坡道、弱4G信号以及光照剧烈变化等因素，都会影响机器人导航与识别效果。现有单一平台模式更多停留在“线上管理”层面，缺少真正意义上的物理执行能力。

（三）治理范式从“静态空间”向“动态触达”转型的逻辑

随着基层群众对精准化、个性化服务需求不断增加，传统“人到点”的静态服务模式已难以满足现实治理需求。引入移动机器人作为平台的延伸执行终端，可以在一定程度上突破固定点位限制，实现弱网环境下的物料配送、引导陪伴以及信息触达。

与此同时，结合非接触式识别技术，可进一步完善身份核验与关怀提示流程，在尽量不打扰老人日常生活的情况下，形成基于数据反馈的动态治理机制。与传统单一机器人应用不同，本文依托816个真实点位构建“平台调度—机器人执行—无感签到”协同闭环，其核心并不只是技术叠加，而是强调基层服务体系中的动态触达能力。

三、融合服务体系总体设计

（一）层次化架构模型

为适应乡村复杂场景下的多任务协同需求，本文构建“平台层—车端层—识别评估层”三维解耦架构，以实现服务调度、移动执行与边缘感知之间的协同运行。

平台管理层主要负责云端调度与资源统筹。系统以微信小程序作为用户入口，并配合后台管理系统完成任务下发、文化资源推送以及志愿者协同管理。平台同时整合现有数字化点位数据，

用于党建宣传、农技指导及中医药科普等多类型业务调度。

车端执行层则基于ROS Noetic中间件构建移动感知与决策系统。通过车载计算单元完成环境建模、路径规划及实时避障，使机器人能够作为平台指令的物理执行终端。

识别评估层部署于边缘端，主要完成非接触式身份核验与动作编码分析。系统仅提取必要特征数据回传云端，以此构建分级提示与关怀预警机制，尽量减少敏感信息暴露风险。

（二）异构通信与数据流转机制

考虑到乡村地区普遍存在网络不稳定的问题，本文设计了“长连接+离线优先”的通信机制，以提升系统在弱网环境中的连续运行能力。

在实时通信部分，系统采用ROSbridge与WebSocket协议实现车端与移动终端之间的双向通信，从而支持远程低时延监控与必要情况下的人工干预。

在隐私与数据安全方面，系统遵循《个人信息保护法》的相关要求，坚持“本地处理、匿名上传”的原则。换言之，原始面部图像数据不会上传至云端，而是在边缘端完成即时处理与销毁，仅保留脱敏后的状态编码数据用于服务调度。

（三）低成本适老化设计策略

考虑到县域场景中的实际部署条件，本文在系统设计阶段便尽量强调低成本与易推广性，因此在软硬件层面都进行了针对性的适配与优化。

首先，在硬件配置上，通过算法轻量化与低功耗模块选型，将单车综合成本控制在1.8万元以内，降低了后续规模化部署门槛。

其次，在交互设计方面，系统采用大字体、高对比度界面，并增加慢速语音播报模块，以适应老年用户的视觉与听觉特点。

并且在我们看来，在针对乡村断网及复杂道路环境的情况下，系统还增加了离线地图重定位功能，从而让机器人在网络异常情况下依旧能够完成基本引导与配送任务。

四、关键技术实现

（一）乡村非结构化环境下的自主导航与多源融合

系统感知层集成RPLIDAR、RGB-D相机与IMU等多种传感器，并采用EKF融合ORB-SLAM3视觉约束与Cartographer激光匹配结果，以提升复杂环境中的定位稳定性。

考虑到乡村道路振动较大，本文进一步引入动态观测权重算子，对观测噪声协方差进行实时调整，以减弱泥土路面和碎石路面带来的高频干扰。实验结果显示，经优化后，YOLOv5s平均推理时间约为60 ms，mAP达到92.5%。在动态障碍物环境下，MPPI路径规划平均耗时120 ms，避障成功率达到97.2%。

状态预测阶段主要利用IMU数据作为控制输入，对机器人运动学模型进行高频先验估计：

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k, w_k)$$

随后结合动态权重修正机制求解最优卡尔曼增益：

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + \alpha_k R_{base})^{-1}$$

从而提升整体状态估计精度。

（二）非接触式面部识别与动作编码

针对老年群体在公共服务交互中操作复杂的问题，本文构建了基于边缘计算的无感知模块。

在身份核验部分，系统采用 ArcFace 模型进行面部特征提取，并结合改进距离度量损失函数，以提高复杂光照环境下的识别稳定性。实测结果显示，单人核验时间控制在 300 ms 以内，识别准确率达到 98.5%。

在行为识别部分，系统结合 OpenPose 骨架提取算法与 LSTM 模型，对疲劳状态、注意力变化等行为特征进行实时编码分析。值得说明的是，该模块并不会长期保存原始图像，而是仅将脱敏后的行为特征转化为服务提示信息，用于后续关怀提醒与闭环派单。

（三）安全、隐私与伦理保障

由于基层治理场景本身涉及较多个人信息与敏感数据，因此在系统设计过程中，安全与伦理问题被放在了相对重要的位置。基于这一考虑，本文进一步建立了对应的安全与伦理约束机制。

首先，所有生物识别原始数据均在本地边缘端完成处理，不进行云端长期存储，从物理层面降低隐私泄露风险。

其次，系统建立分级权限控制机制，并保留志愿者人工审核流程，确保技术系统始终处于辅助角色。

此外，动作编码结果仅作为关怀建议使用，严禁替代专业医疗诊断。基于此，可以在一定程度上避免技术应用越过基层治理中的伦理边界。

五、应用流程与闭环治理机制

本文构建了“常态化 + 专项化”并行运行的双轨服务机制，以提升基层公共服务的动态响应能力。

在活动专项流中，平台会在活动开始前自动生成调度任务；活动进行期间，机器人负责现场核验、路线引导及状态监测；活动结束后，系统根据识别结果自动触发异常回访与志愿者跟进机制。

在日常关怀流中，机器人则主要承担送货到户、定时巡检及陪伴提醒等便民服务功能。

通过前端感知模块持续回传状态编码信息，平台最终形成“服务派发—状态反馈—效果评估”的闭环逻辑，从而增强基层治理中的数字化感知能力。

六、实验验证与效果评估

（一）车端底层性能验证

实验结果表明，在 50 次重复测试条件下，系统 SLAM 建图准确率达到 98.7%。自主导航成功率为 96.2%，整体运行稳定性较高。

在路径规划算法对比中，MPPI 算法在动态障碍物环境中的综合表现优于 TEB 与 DWA 方案，尤其在复杂路径与临时障碍物场

景下，避障稳定性更为明显。

（二）系统综合效能评估（对照实验）

本文进一步将所构建的融合体系与传统人工服务模式进行准实验对比。结果显示，在相同服务规模条件下，系统在末端触达效率、组织成本以及关怀识别精准度等方面均表现出较明显优势。

其中，末端服务效率提升 32.1%，组织成本下降 28.0%，关怀精准度提高 41.1%。从整体运行情况来看，移动机器人与边缘感知系统的引入，确实增强了基层公共服务体系的动态响应能力。

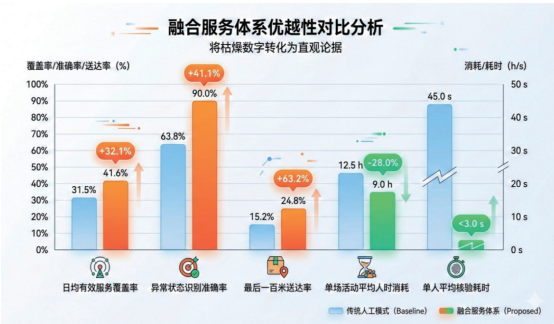


图 1：融合服务体系效能评估分组柱状图

七、结论

总体而言，本文所提出的“云端调度—ROS 移动执行—边缘感知”融合体系，在乡村公共服务场景中表现出一定的工程应用潜力。从目前测试结果来看，该体系能够在一定程度上缓解基层服务中长期存在的人力不足与触达效率偏低等问题。通过将移动机器人嵌入“门前三小”点位网络，实现了公共文化投递、便民跑腿与适老关怀等业务协同，也在一定程度上缓解了基层人力不足与服务触达不均的问题。

不过，当前体系仍存在一些需要进一步优化的方面。例如，弱网环境下的数据连续性与电池续航能力，仍然会影响长距离作业稳定性；多车协同调度算法以及乡村环境中的长期运维成本，也有待后续研究进一步完善。

未来，研究将重点围绕“端云大模型融合”展开，尝试提升机器人对老年用户自然语言的理解能力，并探索基于 5G 通信的高可靠远程接管机制，以增强复杂场景下的服务稳定性与交互友好性。

参考文献

[1] 曾阳剑. 基于 ROS 的多传感器融合巡检机器人系统研究 [J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(2): 377–390. DOI: 10.12677/airr.2025.142037.

[2] 蔡明珠, 刘肖燕, 唐志伟. 基于多传感器融合 SLAM 的 ROS 服务机器人研究 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(2): 65–70.

[3] 陈波, 耿达. 城镇化加速期我国农村文化建设: 空心化、格式化与动力机制 [J]. 中国软科学, 2014(7): 77–91.

[4] 陈天祥, 蓝云, 胡友芳. 双重嵌入: 以数字技术打破基层治理中的条块分割 [J]. 江苏行政学院学报, 2023(1): 1–12.

[5] 国家发展改革委社会司. 湖南攸县: “门前三小”搭建农村文化大舞台 [EB/OL]. (2021–01–19).

[6] 湖南省发展和改革委员会. 湘村数智 | 数字乡村建设的“攸县路径” [EB/OL]. (2025). <https://gov.rednet.cn/content/646956/69/15570405.html>.

