

# 基于多传感器融合的老年人健康检测机器人体征监测系统设计

马玉英<sup>1</sup> 徐坤<sup>1</sup> 孙涛<sup>1</sup> 李海涛<sup>1</sup> 江子昊<sup>1</sup> 赵雅倩<sup>2</sup>

1 山东工程职业技术大学, 山东省济南市, 250200;

2 浪潮电子信息产业有限公司, 山东省济南市, 250013;

**摘要:** 全球老龄化进程加速推动智能养老技术革新, 老年人健康检测机器人作为居家养老的核心设备, 其体征监测精度与可靠性直接依赖多传感器融合技术的发展。本文围绕多传感器融合在老年人健康检测机器人中的应用展开综述, 首先分析该领域的研究背景与需求, 随后系统梳理传感器选型与协同策略、数据融合算法的演进、系统功能设计的研究现状, 进而总结当前技术面临的挑战, 最后展望未来发展趋势。研究发现, 多传感器融合技术已从单一数据处理向多模态协同、智能化分析方向突破, 但在复杂环境适应性、老年人使用友好性、成本控制等方面仍需优化, 未来结合人工智能与物联网技术的深度融合将成为核心发展方向, 为老年人健康管理提供更高效、精准的技术支撑。

**关键词:** 多传感器融合; 老年人健康检测机器人; 体征监测

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.03.020

## 引言

在人口老龄化加剧的当下, 传统健康监测方式难以满足老年人实时、连续的健康管理需求, 集成多传感器的健康检测机器人成为关键技术载体。多传感器融合技术通过整合生物体征传感器、姿态与距离传感器、环境传感器的优势, 弥补单一设备不足, 实现从被动感知到主动监测的升级。聚焦多传感器融合在老年人健康检测机器人体征监测中的应用, 综述涵盖传感器选型与协同设计、数据融合算法研究进展、系统功能与应用场景优化三方面, 旨在全面呈现该领域研究现状, 为后续技术研发提供参考。

## 1 老年人健康检测机器人的传感器选型与协同设计

### 1.1 核心传感器类型与功能定位

老年人健康检测机器人的传感器配置需围绕体征监测与安全防护两大核心需求展开。体征监测类传感器负责采集生命体征数据, 如心率血氧传感器、体温传感器、血压传感器等, 采用非侵入式设计, 集成于腕带或机器人接触端。安全监测类传感器实现跌倒检测与姿态识别, 包括姿态传感器、距离传感器及视觉传感器, 部分研究引入毫米波雷达弥补光线不足问题。环境适配类传感器感知温湿度、光照及障碍物, 辅助修正体征数据误差并保障机器人移动安全。若需删除特定数据, 可按传感器类别定位对应段落, 直接移除相关型号或功能描述, 确保剩余内容逻辑连贯即可。

### 1.2 传感器协同策略研究进展

传感器协同设计的核心是解决数据互补与干扰抑制问题, 现有研究形成两种典型协同模式:

**分布式协同模式:** 将传感器分为固定模块与可穿戴模块, 固定模块集成于机器人本体(如环境传感器、视觉传感器), 可穿戴模块(如腕带式体征传感器)由老年人佩戴。两者通过蓝牙、LoRa等无线通信实现数据同步, 优势在于突破机器人移动范围限制, 实现24小时连续监测, 尤其适用于夜间卧床等场景。但需解决无线传输的稳定性与功耗平衡问题, 部分研究采用低功耗休眠加触发唤醒机制, 在保证数据实时性的同时延长设备续航。

**集中式协同模式:** 所有传感器集成于机器人本体, 通过机器人自主移动调整探测位置, 如通过机械臂调整体征传感器与人的接触距离, 或利用云台控制视觉传感器角度。该模式的优势在于传感器同步性高, 避免无线传输延迟, 适用于室内固定活动区域(如客厅、卧室)的监测。但对机器人导航与定位精度要求较高, 需结合SLAM技术优化移动路径, 确保传感器与人的有效探测距离。

### 1.3 选型设计的关键考量因素

现有研究表明, 传感器选型需综合三大因素:

**老年人使用适配性:** 避免复杂穿戴设计, 优先选择体积小、重量轻的传感器, 同时减少皮肤直接接触的不适感, 如采用非接触式红外体温测量替代传统接触式传感器;

**环境适应性:** 考虑居家场景的多样性, 如卫生间潮湿环境需选择防水传感器, 卧室暗光环境需优化视觉或

雷达传感器的探测性能;

成本与可扩展性: 民用机器人需控制硬件成本, 避免过度依赖高精度昂贵传感器(如医疗级血压传感器), 同时预留传感器接口, 支持后期功能升级(如新增血糖监测模块)。

## 2 多传感器融合算法的研究进展与性能对比

### 2.1 经典融合算法的应用与优化

多传感器融合算法依据数据处理层级, 可划分为数据级、特征级与决策级融合。在现有研究里, 经典算法的应用最为广泛:

**数据级融合:** 针对原始数据开展预处理与整合工作, 典型算法包含卡尔曼滤波及其改进算法。在体征监测方面, 卡尔曼滤波常用于心率、血氧数据的平滑处理, 通过构建状态方程与观测方程, 抑制因运动干扰产生的高频噪声。部分研究运用扩展卡尔曼滤波(EKF)来解决非线性数据问题, 或采用无迹卡尔曼滤波(UKF)提高非高斯噪声环境下的稳定性。实验显示, 此类算法能够将心率数据的波动范围从 $\pm 5\text{bpm}$ 降低至 $\pm 2\text{bpm}$ 以下。

**特征级融合:** 先提取各传感器数据的关键特征, 随后进行融合。常用算法有主成分分析(PCA)、小波变换融合。在跌倒检测中, 研究人员借助PCA对姿态传感器的加速度特征与距离传感器的位置特征进行降维处理, 以减少数据冗余; 或者采用小波变换分解不同传感器的时域信号, 提取高频冲击(如跌倒瞬间加速度)与低频趋势(如人体活动姿态)特征, 增强特征辨识度。

**决策级融合:** 基于各传感器的独立决策结果进行综合判断, 典型算法包括加权融合、D-S证据理论、贝叶斯推理。加权融合在跌倒检测中的应用较为广泛, 通过动态调整姿态传感器与距离传感器的权重系数(例如根据环境光线调整视觉传感器权重), 计算跌倒置信度; D-S证据理论则适用于多传感器决策存在不确定性的场景, 如融合视觉与雷达数据判断人体是否处于危险姿态, 能有效降低单一传感器的误判率。

### 2.2 智能融合算法的创新探索

随着人工智能技术的发展, 基于机器学习与深度学习的智能融合算法成为研究热点, 主要聚焦于两个方面:

**机器学习融合算法:** 如支持向量机(SVM)、随机森林、梯度提升树(XGBoost)等, 通过训练模型来学习多传感器特征与健康状态的映射关系。在体征异常识别中, 研究人员利用随机森林融合心率、体温、血压数据, 构建异常状态分类模型, 相较于传统阈值判断, 准确率提高了10%-15%; 在跌倒检测中, SVM通过核函数处理非线性特征, 解决不同跌倒姿势(如向前跌倒、侧向跌倒)的识别差异问题。

**深度学习融合算法:** 以神经网络为核心, 实现多模

态数据的端到端融合。典型模型包括卷积神经网络(CNN, 用于视觉与传感器特征提取)、循环神经网络(RNN/LSTM, 处理时序体征数据)、Transformer(捕捉多传感器数据的长时依赖关系)。部分研究提出多分支CNN-LSTM模型, 分别处理视觉姿态特征与传感器时序数据, 再通过注意力机制实现特征加权融合, 跌倒检测准确率可达98%以上, 同时降低对单一传感器的依赖。

### 2.3 不同融合算法的性能对比与适用场景

现有研究通过实验对比不同算法的性能, 结果表明:

**经典算法:** 优势在于计算复杂度低、实时性强, 适用于机器人边缘计算模块(如基于STM32、ESP32的微控制器), 但对非线性、非高斯数据的处理能力有限, 更适合体征数据平滑、简单跌倒场景的监测;

**机器学习算法:** 需要一定样本量来训练模型, 准确率高于经典算法, 但对硬件计算资源有一定要求, 适用于配备中端处理器(如树莓派、JetsonNano)的机器人, 适合多体征异常分类、复杂环境下的姿态识别;

**深度学习算法:** 准确率最高, 可处理多模态复杂数据, 但计算复杂度高、模型体积大, 通常需要云端或机器人高性能计算模块(如NVIDIA Jetson AGX)支持, 适用于对精度要求高的场景(如高危老年人24小时监护)。

## 3 多传感器融合系统的功能设计与应用场景优化

### 3.1 核心功能模块的设计特点

基于多传感器融合的老年人健康检测机器人, 系统围绕监测-分析-预警-交互形成闭环, 核心模块设计有三大趋势: 实时监测与数据处理模块采用边缘计算+云端协同架构, 边缘端负责传感器数据采集、预处理与简单融合, 降低传输延迟; 云端承担复杂融合算法、数据存储与分析任务, 实现体征数据查询与风险预测。部分系统引入边缘AI芯片提升实时性。异常预警与分级响应模块根据融合数据将健康风险分为一般异常和紧急异常, 对应不同预警策略。一般异常通过本地声光和APP提醒, 紧急异常增加短信通知等功能, 部分研究探索与120联动。远程交互与用户适配模块针对老年人操作能力弱简化交互设计, 如配备大尺寸触摸屏和语音控制, 家属端APP提供简洁报告与一键通话, 医护端支持多用户管理与报告生成。部分系统加入情感交互功能提升用户接受度。

### 3.2 典型应用场景的优化策略

现有研究针对不同居家场景特点优化传感器融合与系统功能: 卧室场景重点关注夜间监测, 采用低功耗和非接触式传感器, 融合心率、呼吸频率数据监测睡眠质量, 用毫米波雷达或红外传感器实现跌倒检测。卫生

间场景采用防水传感器模块，优化融合算法识别危险动作，部分系统配备扶手辅助功能。客厅场景集成多模态传感器，监测活动量，调整机器人移动路径，支持主动式体征监测。

### 3.3 现有系统的应用成效与局限

实际应用中，多传感器融合系统在部分养老机构与家庭试点取得成效：体征监测精度上，融合算法使心率、血氧监测误差率低于3%，跌倒检测准确率超95%；用户体验上，简化交互与主动监测提升老年人使用意愿，超80%老年人可独立操作基础功能。但系统存在局限：一是复杂环境适应性不足，强光、遮挡物影响传感器性能；二是个性化适配不足，未充分考虑个体健康差异；三是成本较高，机器人价格难在普通家庭普及。

## 4 当前研究面临的挑战

多传感器数据异构与同步问题：不同类型传感器数据格式、采样频率差异大，数据融合有时间差与格式不兼容问题，无线传输还会因信号延迟加剧同步问题，影响融合精度。复杂环境干扰抑制难题：居家电磁干扰、环境因素影响传感器性能，现有融合算法对干扰自适应调整能力有限，难覆盖复杂场景。算法实时性与精度平衡：高精度融合算法计算资源需求大，本地硬件难实时处理，经典算法实时性强但精度不足，在有限硬件资源下实现高精度低延迟融合是核心挑战。老年人用户适配不足：部分系统交互设计未考虑老年人需求，传感器佩戴不适，且老年人对技术信任度低，影响系统推广。数据安全与隐私风险：系统采集的体征数据属敏感信息，云端存储与传输有泄露风险，部分系统权限管理机制不完善，影响用户接受度。产业链协同与标准缺失：智能养老产业多领域缺乏统一技术标准，不同品牌系统难兼容，与医疗服务平台对接机制不完善，难实现全流程闭环。硬件成本控制难题：高精度传感器与高性能计算模块价格高，机器人成本难降，保证性能下降低成本是产业化关键。规模化应用适配不足：现有系统多为实验室研发或小范围试点，缺乏大规模应用稳定性验证，需更强自适应能力满足推广需求。

## 5 未来发展趋势

人工智能与多传感器融合的深度整合：未来将进一步完善深度学习模型，例如采用轻量化Transformer模型以及模型量化技术，减少算法对硬件资源的依赖，达成机器人本地的高精度融合处理；同时，引入联邦学习技术，在保障数据隐私的基础上，运用多中心数据对模型进行训练，增强系统对不同人群的适配能力。多模态传感器的创新性应用：新型传感器技术将逐步融入系统，

如柔性电子传感器（可贴合皮肤，提高舒适度）、光纤传感器（抗电磁干扰能力较强）、气体传感器（可监测呼吸气体成分，辅助判断健康状况）；同时，传感器将朝着微型化、集成化方向发展，实现多功能一体的模块设计，降低硬件成本与体积。物联网与边缘计算的协同优化：借助5G/6G技术提高传感器数据传输的速度与稳定性，实现边缘与云端的无缝协同；边缘计算节点将进一步下沉，例如在家庭网关部署融合算法，分担机器人的计算压力，同时支持多机器人协同监测，覆盖更大的居家范围。个性化健康管理的深入推进：系统将结合老年人健康档案（如慢性病病史、用药情况），构建个性化体征正常范围与预警阈值；通过长期的融合数据分析，实现健康风险预测（如预测心血管疾病发作风险），从被动预警向主动预防转变。

## 6 结语

多传感器融合技术是智能硬件与老年人健康管理的关键纽带，在健康检测机器人领域的研究与应用，是应对老龄化、推动养老服务转型的支撑。该技术从传感器选型、融合算法、系统功能三方面，呈现体征监测研究现状，并剖析挑战、展望趋势。其核心价值体现在：传感器协同设计优化，为体征监测提供全场景硬件基础；融合算法迭代升级，构建数据处理核心；系统功能闭环设计，实现服务升级。该技术不仅有技术价值，还有提升老年人健康管理、减轻照护压力、推动产业创新等社会意义。当前研究存在数据异构性、用户适配性、成本控制等局限。未来研究将聚焦多模态融合创新、用户需求导向设计、产业链协同及场景拓展。

### 参考文献

- [1] 王一竹. 基于UWB雷达传感器的人体呼吸和心跳特征获取与处理[D]. 电子科技大学, 2025.
- [2] 常菁, 冯锋. 基于多传感器数据融合算法的智能健康监测座椅系统设计与研究[J]. 电子测试, 2019(11): 56-58.
- [3] 刘映群, 黄嘉源, 李泳智, 等. 基于人工智能的居家老人监护系统的设计与实现[J]. 传感器世界, 2024(01): 030.

作者简介：马玉英，1985.01，汉，山东日照，硕士研究生，教授，研究方向为智能硬件设计与开发。

项目来源：山东省职业教育“技能大师工作室”——赵雅倩技能大师工作室、山东工程职业技术大学2024年度大学生科技创新项目：智能手杖——“呦呦智鸣、视护亲卿”（项目编号121）