多模态感知融合的人工智能居家康复干预系统研究

田 垚 谢镕骏 王赫泽 刘瑛滔 王 研

牡丹江医科大学 黑龙江 牡丹江 157011

【摘 要】：我国人口老龄化进程持续加快，失能半失能老人、脑卒中及慢性病康复人群数量庞大，传统线下康复模式受时空、经济、医疗资源限制，难以满足大众居家康复需求。为解决康复评估主观性强、干预方案同质化、康复连续性不足等行业痛点，本文研发一款多模态感知融合的人工智能居家康复干预系统。该系统整合视觉、生理、运动多维度感知数据，采用轻量化 CNN-LSTM 混合深度学习模型，构建“感知- 评估- 干预- 监测- 反馈- 优化”全流程闭环康复服务体系。

【关键词】：多模态感知；人工智能；居家康复；闭环干预；数智康养

DOI:10.12417/2811-051X.26.13.054

引言

据世界卫生组织公开数据显示，全球 60 岁以上人口占比已突破 12%，预计 2050 年将升至 22%，超 30%老年人口存在不同程度的肢体功能障碍与慢性病康复需求。截至 2025 年底，我国 60 岁及以上老年人口达 2.8 亿，占总人口 19.8%，失能、半失能老年群体超 4000 万，慢性病确诊患者突破 4 亿，居家康复刚需市场规模持续扩大。当前我国康复医疗资源分配极度不均衡，优质康复资源高度集中于一二线城市三甲医院，基层医疗机构、社区及偏远地区普遍存在康复设备落后、专业康复治疗师缺口大的问题，据行业统计，国内康复治疗师人才缺口超 40 万人，绝大多数出院患者、老年康复人群无法获得持续、规范、个性化的居家康复专业指导。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

欧美、日本等发达国家智能居家康复研究起步早，已形成成熟的技术体系与商业化布局。麻省理工学院研发的 RehabRobot 系统，融合深度相机与肌电传感器采集患者运动数据，实现肢体康复状态精准感知；斯坦福大学医学院搭建的 AI 康复评估系统，依托多模态数据深度学习分析，功能障碍识别准确率超 85%；德国慕尼黑工业大学采用强化学习算法，可动态生成个性化康复方案并实时优化调整。Fitbit Care、Sony Rehab 等商业化产品已落地应用，实现居家康复监测与远程方案调整。但国外方案存在明显适配缺陷，高端感知设备价格高昂，普通家庭难以普及；多源异构数据融合延迟高、误差大；算法模型基于欧美人群数据集训练，与我国老年、脑卒中患者体征适配度低；产品功能单一，多聚焦肢体监测，无法与国内医疗机构服务体系对接，落地实用性有限。

1.2 国内研究现状

在国家数字健康、智慧康养相关政策加持下，国内智能康复领域研究快速发展。清华大学研发的便携式肌电传感器，成本仅为国外同类产品的 1/3；北京邮电大学、上海交通大学医学院相继完成本土化智能康复算法研发，识别准确率超 80%；科大讯飞、华为等企业的智慧康养产品已进入社区试点，服务数十万用户。与此同时，国内研究仍存在诸多短板，核心传感器与算法组件依赖进口，本土化标注数据集稀缺；多数产品仅具备数据监测功能，未形成完整康复干预闭环；系统操作复杂，老年用户适配性差；设备落地成本高、基层普及率低，重技术研发、轻临床实用优化。因此，研发一款低成本、本土化、全闭环的多模态 AI 居家康复系统，是当前国内康养领域的迫切需求。

2 系统总体设计

2.1 系统总体架构

本系统采用四层分层架构设计，涵盖感知层、算法层、服务层、应用层，各层级协同运作，实现康复全流程智能化服务。

感知层：采用国产深度相机、肌电传感器、心率血氧模块、IMU 惯性测量单元，同步采集人体视觉姿态、肌肉电信号、生理体征、关节运动等多源数据，完成数据降噪、时序对齐与预处理，为算法分析提供精准原始数据，国产硬件大幅降低家庭部署成本。

算法层：为系统核心核心模块，包含多模态数据融合、AI 康复评估、个性化方案生成、姿态纠错、效果预测五大功能模块。通过 CNN 提取空间姿态特征，LSTM 提取时序运动与生理特征，结合注意力机制完成多模态特征融合，嵌入国内康复临床指南规则，保障干预方案的专业性与规范性。

服务层：依托云端平台实现数据加密存储、用户管理、模型调用、权限管控与医护远程对接，打通居家康复端与医疗机构的数据链路，支持医师远程查看康复数据、调整干预方案。

应用层：分为患者移动端与医师 Web 管理端。患者端实现

基金来源：牡丹江医科大学第十六届大学生科研项目，一般项目，项目编号：2026051。

康复方案展示、实时训练引导、动作纠错、打卡记录、报告查询功能；医师端可实现用户管理、数据查阅、方案优化、风险预警等远程管控功能。

系统形成完整业务闭环：多模态设备采集数据→感知层预处理传输→算法层智能分析评估→生成个性化康复方案→移动端引导训练→实时监测纠错→数据云端回传→AI 动态优化方案+医师人工复核，实现全流程闭环干预。

2.2 关键技术实现

2.2.1 多模态感知数据预处理与融合

系统搭载的各类传感器采样频率存在客观差异，其中视觉深度相机采样频率 30Hz、IMU 惯性测量单元 100Hz、表面肌电传感器 200Hz。本研究通过硬件时间戳同步算法完成多源数据时序精准对齐，采用卡尔曼滤波算法消除运动抖动噪声，结合小波变换过滤居家环境光照干扰噪声，对不同量纲、不同量级的运动、生理数据实施统一归一化预处理。采用特征级混合融合策略，分别提取视觉姿态关键点空间特征、IMU 关节角度时序特征、肌电时域频域特征与心率生理特征，通过注意力机制动态分配各模态权重：康复姿态异常识别阶段，强化视觉与 IMU 运动数据权重；肌肉疲劳、运动负荷评估阶段，强化肌电、心率生理数据权重，实现多源数据互补纠错，有效提升系统康复识别与评估精准度。

2.2.2 轻量化 CNN- LSTM 康复 AI 模型

针对传统深度学习模型参数冗余、移动端适配性差的问题，本研究构建轻量化 CNN- LSTM 混合模型，通过卷积层剪枝、参数量化压缩缩减模型体积，可在普通手机、平板实现本地推理，无需完全依赖云端，降低网络延迟，保护用户隐私。CNN 负责提取人体骨骼关节空间特征，LSTM 捕捉康复运动时序变化规律，融合多模态数据后输出功能障碍等级、动作正误、疲劳风险等评估结果。同时引入可解释 AI 技术，明确算法判断依据，提升临床应用可信度。

3 研究方法与试验结果

3.1 研究方法

本研究采用四类科学研究方法，保障试验数据真实、准确、可控。一是文献研究法，检索 CNKI、万方、PubMed 等核心数据库，筛选多模态感知、智能康复、居家干预相关核心文献 30 余篇，系统梳理国内外研究现状与技术短板，明确本研究创新切入点。二是问卷调查法，面向脑卒中术后、老年功能衰退、慢性病康复等居家康复人群随机发放调查问卷 300 份，回收有效问卷 213 份，有效回收率 71%，精准调研用户核心康复需求与设备使用诉求，具体统计结果如下表所示。

表 1 居家康复人群问卷统计结果（N=213）

调查项目	选项	占比(%)
康复训练场所意愿	希望居家训练	72.4
	社区康复中心	18.3
	医院康复科	9.3
居家康复主要顾虑	动作错误无人纠正	65.7
	设备价格过高	58.3
	不会操作智能设备	41.2
	缺少专业康复方案	37.6
可接受硬件价格区间	1000 元以内	69.1
	1000- 3000 元	24.7
	3000 元以上	6.2

三是原型开发与仿真实验，完成系统四层架构原型搭建，招募 56 名康复受试者（含脑卒中后遗症患者 22 人、老年肢体功能衰退患者 20 人、术后康复患者 14 人），采集标准化多模态康复数据集，分组对比单一视觉、视觉+IMU、多模态融合三种方案的算法性能，保证试验变量唯一、数据客观可对比，具体性能参数见表 2。四是模拟对照试验，选取 22 名基线功能无显著差异的居家康复受试者，随机分为试验组、对照组各 11 人，开展为期 8 周的标准化康复对照试验，全程统一训练时长、训练项目，仅干预方式不同，验证系统实际干预效果。

表 2 不同感知方案算法性能对比

感知方案	动作识别准确率(%)	单帧数据平均处理耗时(ms)
仅视觉摄像头	73.1	94
视觉+IMU	80.2	110
本系统多模态融合	85.7	126

3.2 试点干预效果

8 周对照试验结果显示，本系统可有效优化居家康复各项核心指标，提升康复效果，具体对比数据如下表所示。

表 3 两组康复指标对比

评价指标	试验组(n=11)	对照组(n=11)
平均训练依从性(%)	81.8±6.3	53.6±7.1
错误动作发生率(%)	14.7±4.5	42.3±6.8
FMA 运动功能量表增值(分)	4.2±1.1	1.7±0.8

试验结束后对试验组用户开展主观满意度调研，数据显示：86.4%的受试者认为系统操作简单、适配老年使用习惯，77.3%的受试者认可实时动作纠错功能对康复训练的帮助，

81.8%的受试者愿意长期坚持使用该系统开展居家康复，90.9%的受试者希望接入医师远程指导功能，用户整体适配度与接受度良好。所有主观评价数据与客观试验指标相互印证，可有效佐证系统的实用性与可行性。

3.3 系统现存局限

本次试验样本规模较小，后续需扩大临床样本开展真实场景试验；居家复杂光照、物体遮挡场景会轻微降低视觉识别精度；系统目前仅覆盖肢体运动康复，未完善认知康复模块；本土化康复数据集仍需持续扩充优化。

4 讨论

4.1 系统创新价值本研究具有多方面创新优势

技术上实现视觉- 生理- 运动三维多模态特征级融合，采用轻量化 CNN- LSTM 模型支持移动端本地运算。系统单帧数据处理耗时 126ms，满足实时反馈要求；动作识别准确率由单一视觉方案 73.1%提升至 85.7%，提升 12.6 个百分点。本土化方面，整套国产硬件成本 1018 元，对比进口套件 2680 元，成本下降 62%，契合问卷中 69.1%用户千元以内的心理价位；同时简化交互适配老年群体，基于本土康复数据集优化算法，降低对国外软硬件的依赖。4.2 社会与实践意义民生角度，系统推动康复资源下沉家庭和社区，缓解国内康复治疗师缺口难题，依靠实时纠错减少居家训练二次损伤，提高康复服务可及性。医疗层面，AI 承担部分重复性筛查工作，减轻医护负担；云端打通院内- 居家康复数据，改善出院后康复服务断裂问题。经济上，能够减少患者往返就医产生的各类开销，测算人均康复综合成本可下降 30%以上，减轻家庭与医保压力，带动国产感知硬件和智慧康养产业发展。4.3 推广挑战与优化对策系统落地面临老年数字素养偏低、居家环境干扰采集、健康隐私安全等问题。对应对策：进一步简化操作，配套教程，依托社区开展使用培训；光线差等场景提高肌电、IMU 权重，弥补视觉缺陷；健康数据加密存储，实行分级权限管理保护隐私。后续计划扩充本土化数据集，完善认知康复模块，开展多中心试验迭代系统性能。

5 结论

针对我国老龄化背景下居家康复资源短缺、人工评估精准度不足、干预方案同质化、康复服务不连续的行业痛点，本研究成功研发多模态感知融合的人工智能居家康复干预系统。系统整合视觉、运动、生理多维度感知数据，依托轻量化 CNN - LSTM 深度学习模型，实现智能化康复评估、个性化方案动态生成、实时动作纠错与远程医护协同，构建完整的闭环康复服务体系。标准化对照试验结果精准验证：系统康复动作识别准确率达 85.7%，硬件成本低廉、本土化适配性强；试验组患者训练依从性 81.8%，远高于对照组 53.6%，错误动作发生率大幅下降，FMA 运动功能评分提升幅度显著优于对照组，可有效改善患者肢体运动功能，提升居家康复质量。

参考文献：

[1] 邓江坤,陈欣,刘建军,等.闭环康复理念指导下中医药疗法与智能穿戴设备相融合的全膝关节置换术后居家康复研究进展[J].中医正骨,2026,38(7):62-68.

[2] 何开丽,肖静,陈颖帆.人工智能在心力衰竭患者居家康复中的应用研究进展[J].医药前沿,2026,16(12):44-47.

[3] 孙荣鑫.康复治疗技术在偏瘫居家患者生活质量改善中的应用[J].新发现,2026,(7):118-120.

[4] 刘雨丹,马艳春,翟亚仙,等.数智化技术在帕金森病患者居家康复中应用的范围综述[J].实用心脑肺血管病杂志,2026,34(3):95-99.

[5] 中国康复医学会社区康复工作委员会,中国康复医学会手功能康复专业委员会,王玉昌,等.脑卒中患者居家康复环境评估与改造实践指南(2025 ICF 版)[J].中国医刊,2026,61(1):1-13.