

基于单被试设计的老年女性太极拳平衡训练系统：人工智能-传感器反馈可行性研究

李莉, 许新

广东食品药品职业学院, 广东广州 510520

摘要: 本研究构建了一种面向老年女性的太极拳实时反馈训练系统, 并在边缘端完成算法部署与推理。系统融合可穿戴惯性测量单元 (IMU) 与表面肌电 (sEMG) 双模传感, 通过轻量化深度学习模型对动作模式进行在线识别与质量评估, 进而输出个性化纠错提示, 以期改善平衡功能、降低跌倒风险。采用单被试实验设计, 对 1 名 70 岁健康女性进行为期 4 周的干预 (经简易伦理审查程序豁免)。结果显示: 动作识别精确率达 92.3%, 反馈延迟 162 ± 18 ms; 静态稳定指数提升 55.8%, 动态平衡控制提升 35.4%; 股直肌与腓肠肌协同激活比显著优化, 异常共收缩下降。研究初步验证了该系统在社区场景下实现低成本、高精度、即时化跌倒预防干预的可行性, 但样本代表性与环境适应性仍需扩大验证。后续工作将推进跨性别多中心试验、临床路径对接及社区规模化部署。**研究目的:** 随着全球人口老龄化趋势持续加剧, 老年人群健康管理面临严峻挑战。流行病学研究表明, 65 岁以上老年人年跌倒发生率约为 28%-35%, 其中近半数导致骨折、颅脑损伤等严重后果, 不仅显著降低患者生活质量, 还造成巨额公共卫生支出。在这一背景下, 探索安全有效的跌倒预防干预措施已成为老年医学与康复工程领域的重点研究方向。太极拳作为中国传统身心锻炼方式, 凭借其缓慢连贯的动作节奏与强调重心控制的运动特性, 已被多项随机对照试验证实具有改善老年人姿势稳定性、增强下肢肌力及降低跌倒风险的临床效益。然而, 传统太极拳教授模式存在两大核心瓶颈: 其一, 依赖教练主观经验的动作指导难以实现训练标准化, 不同学员的姿势偏差无法被及时量化识别; 其二, 集体授课模式缺乏针对个体生理特征 (如关节活动度、肌肉代偿模式) 的动态适应性调整, 导致训练效果存在显著个体差异。这些问题在神经肌肉功能退化的高龄老年群体中尤为突出, 严重制约了太极拳在精准健康干预中的应用潜力。为突破上述限制, 本研究聚焦于技术创新与伦理可行性的平衡, 提出一种数据驱动的解决方案: 通过整合多源生物力学传感技术 (包括惯性测量单元对肢体运动学的捕捉、表面肌电对肌肉激活模式的监测) 与人工智能算法 (基于时空特征提取的动作质量评估模型), 构建面向老年个体的实时太极拳训练辅助系统。该系统旨在实现三大目标: (1) 通过高精度传感器网络客观量化太极拳动作执行过程中的关节运动轨迹与肌肉协同模式; (2) 利

用边缘计算架构下的自适应算法，生成个性化动作修正提示（如视觉/触觉反馈）以纠正特定错误姿势；（3）鉴于群体研究伦理审查的复杂性，本研究采用单被试范式作为初步验证策略，符合《赫尔辛基宣言》对最低风险探索性研究的要求，在严格遵循科研伦理原则的前提下，采用单被试研究范式验证系统技术可行性，为规避群体研究中复杂的伦理审查流程提供替代性方案，同时积累关键参数用于后续扩大样本研究的设计优化。本研究的核心价值在于：首次将多模态生物信号融合策略应用于老年人群太极拳训练的实时指导场景，既保留了传统太极拳的神经调控优势，又通过数字化手段弥补了其个性化反馈缺失的短板。研究结果有望为社区老年人跌倒预防干预提供可穿戴技术支持，并为特殊人群运动康复研究中的伦理困境提供新的方法论参考。

研究方法：2.1 研究对象 本研究选取一名 70 岁健康老年女性作为研究对象。该研究对象身高 158 cm，体重 62 kg，无神经系统疾病史，简易体能状况量表（SPPB）评分为 8/12，具体测试项目主要包括（平衡、步行速度、椅子起立）。研究对象自愿签署知情同意书（仅需个人同意，不涉及伦理委员会审批）。2.2 系统架构设计 本研究构建的实时反馈系统由多模态传感层、生物力学参数标定和反馈交互层组成。多模态传感层包括惯性测量单元（IMU）和表面肌电（sEMG），IMU 部署于腰部、双腕和双踝，针对老年女性体型特征进行优化，sEMG 监测胫骨前肌与腓肠肌激活模式。基于树莓派 4B 平台部署轻量化时空图卷积网络（ST-GCN），实时计算动作相似度指数（ASI），并根据每日训练数据更新个性化动作模板库。反馈交互层包括视觉提示和触觉反馈，视觉提示通过 AR 眼镜投射动作偏差提示，触觉反馈通过腕部马达振动实现。在基线期完成静态平衡基准和动态动作模板的标定，为实时误差检测提供参考。

实验流程：3.1 基线期评估（第 1 周）3.1.1 实验条件标准化。为确保实验的生态效度（ecological validity），基线评估严格模拟老年女性日常运动习惯进行。着装要求：要求被试穿着自备轻便运动鞋（鞋跟高度 ≤ 2 cm，鞋底硬度 ≤ 60 Shore A），鞋型选择为老年女性普遍使用的圆头防滑款式（鞋头翘度 $\leq 15^\circ$ ），鞋重 ≤ 300 g（ ± 10 g），以最大限度贴近真实生活场景。环境控制：实验室温度维持 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，湿度 $50\% \pm 5\%$ ，地面铺设与社区活动中心相同的 PVC 防滑垫（摩擦系数 0.45-0.55）。3.1.2 生物力学基线数据采集 静态平衡能力：使用 Kistler 9286AA 测力台（采样率 100 Hz）采集双足自然站立（两脚间距与肩同宽）时的压力中心（COP）轨迹，双足自然站立睁眼 60 秒后，继续闭眼测试 30 秒，但闭眼数据因被试眩晕风险未纳入分析。计算指标包括：①95%置信椭圆面积（CEA），反映姿势摇摆的整体范围，值越小表明静态稳定性越高；②前后方向动摇速度（ML-Speed），计算 COP 在额状轴方向位移的标准差与时间的比值，评估抗干扰能力；③基线结果显示，CEA 为 $5.2\text{cm} \pm 0.3\text{ cm}^2$ ，ML-Speed 为 $2.6 \pm 0.2\text{ cm/s}$ ，与同年龄段健康女性参考值（CEA 4.8-6.1 cm^2 ）相符，表明被试静态平衡能力处于正常衰老水平。动态动作标准化：采用 Vicon MX-T40 三维

动作捕捉系统（12 摄像头，200 Hz）标定太极拳“单鞭”动作的关节运动学基准值，在主要关节（C7、肩峰、髂前上棘、股骨外侧髁、外踝）粘贴反光标记点，以 Helen Hayes 模型计算关节角度。主要包括：①躯干倾斜角，即矢状面内最大前倾角为 $12.5^{\circ} \pm 1.3^{\circ}$ （参考范围 10° - 15° ）；②踝关节内翻角，即支撑腿在动作转换期的内翻峰值为 $11.8^{\circ} \pm 2.1^{\circ}$ ，接近老年女性安全阈值（ $\leq 12^{\circ}$ ）；③步幅对称性，即左右步长差异率为 8.7%（正常衰老人群 $< 10\%$ ）。

3.1.3 穿戴设备适配性验证

为确保数据可比性与生态效度，实验全程严格标准化。穿戴设备校准，每日训练前校验 IMU 零点漂移（ $\pm 0.3^{\circ}$ 以内），sEMG 信号信噪比 ≥ 20 dB；AR 眼镜镜腿长度与鼻托高度根据被试脸型调整，确保视场中心与眼球瞳孔对齐。环境与着装规范，实验室温湿度恒定（ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ， $50\% \pm 5\%$ ），地面铺设社区级防滑垫（摩擦系数 0.45-0.55）；被试穿着自备轻便运动鞋（鞋跟 ≤ 2 cm，硬度 ≤ 60 Shore A），服装为弹性棉质长袖衫与长裤，避免宽松衣物遮挡传感器。

3.2 干预期系统训练（第 2-5 周）

3.2.1 实时反馈机制

错误动作识别：当躯干倾斜角超过个性化阈值（基线值 $\pm 2^{\circ}$ ）或踝关节内翻角 $> 12^{\circ}$ 时，系统触发两级反馈，初级提示—AR 眼镜显示黄色警示框与偏差数值（如“左踝内翻： 13.2° ”）；持续错误—若 5 秒内未纠正，腕部振动马达启动 3 级强度提示（频率 50 Hz，持续时间 1s）。

3.2.2 训练数据记录

运动误差率定义为单次训练中错误动作次数占总动作数的比例，从第 1 天的 23.6% 下降至第 4 周的 8.9%（降幅 62.3%）；肌肉激活延迟为胫骨前肌激活时间从基线期的 $152 \text{ ms} \pm 18 \text{ ms}$ 缩短至 $102 \pm 12 \text{ ms}$ （ $p=0.017$ ），表明神经肌肉响应效率提升。

3.3 结果分析

3.3.1 平衡功能改善

静态平衡 CEA 从 5.2 cm^2 （95% CI: 5.0-5.4）降至 2.3 cm^2 （降幅 55.8%），ML-Speed 由 2.6 cm/s 降至 1.5 cm/s ，与传统太极拳干预的文献报道效果（约 30%-40% 降幅）相比更具优势，提示实时生物力学反馈可能通过增强感觉运动整合改善姿势控制。动态平衡功能性前伸测试（FRT）距离从 17.8 cm 增至 24.1 cm（提升 35.4%），且被试在“转身摆莲”动作中的足底压力中心偏移速度降低 29%，表明动态稳定性显著增强。

3.3.2 动作优化与代偿机制

“蹬脚”动作的踝关节内翻角从 11.8° 降至 4.2° （ $p < 0.01$ ），踝关节力矩分布趋近于文献报道的健康老年女性参考范围（距下关节力矩占比从 62% 调整至 48%），关节运动学上表明运动代偿减少；腓肠肌外侧头与胫骨前肌的共激活协调指数（Co-activation Index, CIC）从 0.68 提升至 0.82（ $p=0.023$ ），表明肌肉协同性（踝关节拮抗肌协调性）改善，有助于降低扭伤风险。

3.3.3 系统接受度与局限性

被试主观反馈认为触觉反馈“易于感知但偶有延迟”，AR 视觉提示在强光环境下（ $> 500 \text{ lux}$ ）辨识度下降，建议增加语音辅助功能。此外，单 IMU 传感器在快速旋转动作（如“双峰贯耳”）中因陀螺仪漂移导致姿态角估计误差达 4.7° ，需融合足底压力信号进行补偿。

结论：本研究通过单被试密集纵向实验，验证了基于可穿戴传感系统（惯性测量单元+表面肌电）与边缘人工智能算法的实时反馈系统在老年女性太极拳训练中的应用效果。研究结果表明，该系统在动作

识别精度、实时性、硬件兼容性等方面均达到预期标准，有效支撑了老年女性太极拳训练的个性化指导需求。系统通过生物力学适配和穿戴人因工程优化，提高了设备的舒适度和适用性。单被试数据显示，该系统辅助训练显著改善了老年女性的平衡功能，包括静态稳定性和动态控制能力。此外，单被试范式在伦理简化、数据深度和成本效益方面展现出独特优势。然而，研究也存在局限性，如，单被试结果无法外推至其他年龄段或健康状况的老年女性，且未评估认知功能对系统使用的影响；传感器在高温高湿环境下的信号稳定性尚未验证，长期使用可能产生设备依赖性；实验室环境与社区实际训练的差异可能影响系统推广效果等。未来研究将聚焦跨性别验证、临床转化和社区集成，以进一步完善系统并推动其广泛应用。

关键词：太极拳；实时反馈；可穿戴传感器；老年平衡训练；边缘人工智能

A Tai Chi balance training system for Older women based on a single-subject design: feasibility study of AI-sensor feedback

Li Li, Xin Xu

Guangdong Food and Drug Vocational College, PE Teacher's Office, Guangzhou 510520

Abstract: This study validates a real-time feedback system for Tai Chi training in elderly women using wearable sensors and edge AI algorithms. The system integrates inertial measurement units (IMUs) and surface electromyography (sEMG) to provide personalized feedback, improving balance and reducing fall risks. The study employed a single-subject design with a 70-year-old healthy female participant, following ethical guidelines to bypass complex IRB approval. The system achieved high accuracy in motion recognition (92.3% precision) and real-time feedback (162±18 ms delay). It enhanced balance function, with static stability improving by 55.8% and dynamic control by 35.4%. The system also optimized muscle activation patterns, reducing injury risks. Despite limitations like sample size and environmental adaptability, the study demonstrates the system's feasibility and potential for community-based fall prevention. Future work will focus on cross-gender validation, clinical integration, and community deployment.

Keywords: Tai Chi; Real-time Feedback; Wearable Sensors; Elderly Balance Training; Edge AI

