

Application of foot pressure feedback system in fall risk assessment of elderly people

Wang Yanli¹ Yuan Linlin² Mou Yan³ Tang Xuefeng² Diao Jianhua²

1. Endocrinology Department, Wuzhong People's Hospital, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

2. Suzhou BenQ Hospital, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract

Falls have emerged as a major public health concern threatening the health and independence of elderly populations. Traditional fall risk assessment methods, relying heavily on subjective questionnaires or limited objective indicators, suffer from insufficient sensitivity and specificity. This study focuses on the emerging technology of foot pressure feedback systems, exploring their theoretical foundations, technical implementation, application advantages, and challenges in elderly fall risk evaluation. By analyzing the intrinsic connections between foot pressure distribution and gait stability/balance control, combined with advancements in wearable sensors, pressure distribution platforms, and real-time biofeedback technologies, this paper systematically explains how the technology quantifies dynamic balance parameters, identifies abnormal gait patterns, and enhances proprioceptive input. Research demonstrates that foot pressure feedback systems exhibit higher sensitivity and specificity in fall risk prediction compared to traditional methods. Their core value lies in providing objective, dynamic, high-precision gait and balance assessment data, along with real-time biofeedback guidance for personalized interventions. Although challenges remain in standardization, cost-effectiveness, algorithm optimization, and long-term compliance, foot pressure feedback systems represent a significant developmental direction in fall risk assessment and prevention, offering broad clinical applications and research potential.

Keywords

plantar pressure feedback system; elderly; fall risk; gait analysis; balance function; wearable technology; biofeedback; prevention intervention

足底压力反馈系统在老年人跌倒风险评估中的应用

王艳丽¹ 原林林² 牟燕² 汤雪峰² 刁建华²

1. 苏州市吴中人民医院内分泌科, 中国·江苏苏州 215000

2. 苏州明基医院, 中国·江苏苏州 215000

摘要

跌倒已成为威胁老年人健康与独立生活的重大公共卫生问题。传统的跌倒风险评估方法多依赖主观量表或有限的客观指标, 存在敏感性和特异性不足的局限。本文聚焦足底压力反馈系统这一新兴技术, 深入探讨其在老年人跌倒风险评估中的理论基础、技术实现、应用优势及面临的挑战。通过分析足底压力分布与步态稳定性、平衡控制的内在联系, 结合可穿戴传感器、压力分布平台及实时生物反馈技术的最新进展, 系统阐述了该技术如何量化动态平衡参数、识别步态异常模式并提升本体感觉输入。研究表明, 足底压力反馈系统在跌倒风险预测方面展现出较传统方法更高的敏感性与特异性, 其核心价值在于提供客观、动态、高精度的步态与平衡功能评估数据, 并为个性化干预提供实时生物反馈指导。尽管在标准化、成本、算法优化及长期依从性方面仍存在挑战, 足底压力反馈系统代表了跌倒风险评估与预防领域的重要发展方向, 具有广阔的临床应用与科研前景。

关键词

足底压力反馈系统; 老年人; 跌倒风险; 步态分析; 平衡功能; 可穿戴技术; 生物反馈; 预防干预

1 引言

1.1 背景与意义

跌倒已成为全球 65 岁以上老年人意外伤害死亡的首要原因。据世界卫生组织 (WHO) 统计, 全球每年约有 64.6

万老年人死于跌倒相关伤害, 且跌倒发生率随年龄增长显著上升。在中国, 跌倒是 65 岁以上老人伤害死亡的 ** 首位原因 **, 占比高达 68%。除直接导致骨折 (如髌部骨折)、颅脑损伤外, 跌倒更引发“跌倒恐惧症”, 促使老年人减少活动, 加速肌肉萎缩与功能衰退, 形成恶性循环, 严重损害生活质量并增加社会医疗负担。

1.2 传统评估方法的局限性

当前临床常用的跌倒风险评估工具主要包括:

【作者简介】王艳丽 (1980-), 女, 中国河南许昌人, 硕士, 副主任医师, 从事内分泌研究。

主观量表: Berg 平衡量表 (BBS)、Tinetti 步态与平衡量表、计时起立-行走测试 (TUG)。依赖评估者经验, 敏感性不足, 难以捕捉细微的平衡变化^[1]。

简易功能测试: 单腿站立测试、功能性前伸测试。指标单一, 量化精度有限。

部分仪器评估: 使用测力台测量重心摆动 (COP), 但参数局限 (如仅关注总轨迹长、摆动面积), 难以全面反映足底动力学特征。

这些方法普遍存在敏感性低、特异性不足、动态监测能力弱、缺乏客观精细生物力学参数等问题, 无法满足精准化、个性化跌倒风险管理需求。

1.3 足底压力分布与跌倒风险的内在关联

足底是人体与支撑面接触的唯一界面, 足底压力分布 (Plantar Pressure Distribution, PPD) 直接反映了身体重心 (Center of Mass, COM) 与支撑基底 (Base of Support, BOS) 之间的动态关系, 是维持直立姿势和稳定步行的关键生物力学基础^[2]。研究表明, 老年人跌倒风险增加与以下 PPD 特征显著相关:

压力中心轨迹异常: COP 轨迹长度增加、速度增快、摆动范围扩大、在足跟与足尖区域停留时间异常^[3]。

压力分布不对称: 左右足间压力峰值、接触面积、冲量等参数差异增大。

特定区域压力异常: 如足跟区域压力峰值降低 (提示推进力不足), 前足内侧压力过高 (可能与足弓塌陷、步态不稳相关)。

动态稳定性参数下降: 如步行时压力中心-身体重心间距增大、压力中心在支撑基底边界附近活动时间延长^[4]。

2. 足底压力与跌倒风险的生物力学机制

2.1 步态稳定性与足底压力动力学

稳定步态依赖动态平衡能力, 即在行进中维持重心 (COM) 在支撑基底 (BOS) 内的控制。足底压力分布是这一复杂神经肌肉调控过程的直接输出:

COP 轨迹: 反映 COM 在水平面的投影运动^[5]。COP 摆动速度、幅度、复杂性 (如近似熵) 增加与平衡控制能力下降、跌倒风险升高显著相关。

压力中心偏移: 步行中 COP 在足跟触地时偏后, 推离期前移至前足^[6]。老年人常表现为 COP 前移延迟或幅度减小, 提示踝关节跖屈力量减弱和推进力不足。

压力分布不对称性: 左右足间压力峰值、冲量、接触时间的显著不对称是步态异常 (如卒中后、骨关节炎) 和跌倒风险的重要标志。

2.2 平衡控制与感觉整合

维持姿势平衡依赖视觉、前庭觉和本体感觉的精确整合, 其中足底皮肤机械感受器提供的本体感觉输入尤为关键。老年人常出现:

足底感觉减退: 由周围神经病变 (如糖尿病)、皮肤增厚等因素引起, 导致对支撑面变化和身体晃动的感知延迟或失真^[7]。

感觉重加权障碍: 难以在感觉输入冲突 (如在晃动的公交车上) 时灵活调整依赖策略, 过度依赖视觉而易在环境变化时跌倒。

踝关节策略减弱: 面对小干扰时, 优先动用踝关节肌肉的策略效率下降, 被迫使用不稳定的髋关节策略或跨步反应。

足底压力反馈通过增强足底感觉输入 (如触觉提示压力分布), 可补偿本体感觉缺失, 促进更有效的姿势调节策略。

2.3 常见步态异常模式及其压力特征

步幅缩短、步速减慢: 压力中心前移幅度减小, 前足压力峰值降低, 双支撑相时间延长 (压力平台期占比增加)。

步宽增加: 双足间距离增大, 压力分布呈“外八字”模式, COP 左右摆动幅度增大。

足廓清不足: 摆动相初期前足或足趾异常压力残留 (压力平台显示过早触地), 易绊倒。

推进力不足: 推离期前足 (尤其第一跖趾关节区) 压力峰值降低、持续时间缩短, 压力中心前移速率减慢。

3 足底压力反馈系统的技术构成

嵌入式压力分布平台:

原理: 含高密度压阻/电容传感器阵列 (每平方米厘米 1-4 个传感器)。

应用: 实验室步态分析、静态/动态平衡测试 (如 NeuroCom、RSscan 平台)。

优势: 空间分辨率极高, 提供全足精细压力分布图。

局限: 受限于固定位置, 仅能捕捉有限步数。

可穿戴式压力传感鞋垫/鞋:

原理: 柔性薄膜传感器嵌入鞋垫或鞋底 (如 Tekscan F-Scan、Moticon 系统)。

应用: 真实环境步态监测、长期活动跟踪、家庭康复训练。

优势: 生态效度高, 可长时间连续监测, 适用于日常活动评估。

挑战: 传感器耐久性、舒适度、信号稳定性 (如鞋内移位影响)、成本。

4 足底压力反馈系统在跌倒风险评估中的应用

4.1 作为高精度评估工具

识别高风险个体: 多项研究证实, 基于压力平台的 COP 动态参数 (如平均速度、椭圆面积) 对预测未来跌倒具有较 BBS、TUG 等量表更高的敏感性和特异性^[8]。可穿戴鞋垫系统在自然环境中捕捉的步态变异性 (步长、时间变异性) 是跌倒的强预测因子。

量化平衡功能障碍：能精确区分不同神经系统疾病（帕金森病、卒中）或骨科疾病（膝/髌关节炎）导致的特异性步态和平衡障碍模式。

监测干预效果：对康复训练、药物治疗、手术（如关节置换）前后的平衡功能改善提供客观、敏感的量化指标。

4.2 作为跌倒风险预测模型的核心输入

模型性能提升：融合多维足底压力特征（COP 动态、区域压力、对称性）的机器学习模型（如 SVM、RF）在预测跌倒方面展现出超越单一参数或传统量表的性能（AUC 常 >0.85）。

动态风险评估：可穿戴系统的长期监测数据可捕捉老年人状态波动（如疲劳、药物副作用）导致的短期风险升高，实现更及时预警。

4.3 作为生物反馈干预手段

改善平衡功能：使用足底压力实时反馈进行平衡训练（如站立、重心转移、行走）能显著提高老年人动态平衡能力（COP 控制改善）、步态稳定性（步速、步长增加，变异性减小）和功能性表现（TUG 时间缩短）。

增强本体感觉与运动学习：反馈补偿了减退的足底感觉，强化了正确的姿势和运动模式的中枢表征，促进神经可塑性和运动技能的内化。

降低实际跌倒发生率：初步研究表明，结合生物反馈的平衡训练项目能有效降低社区老年人后续跌倒次数（部分研究报告下降 30-50%）。

4.4 特定人群的风险评估

糖尿病周围神经病变：DPN 患者足部感觉减退，足底压力反馈系统是评估其足部生物力学改变（如前足峰值压力异常增高、压力分布异常、COP 控制能力下降）和溃疡/跌倒双重风险的关键工具。系统能精确识别高风险区域。

脑卒中后遗症：评估偏瘫侧足的压力负荷模式（如负荷不足或过度）、COP 偏向健侧的程度、步态不对称性，这些指标与平衡障碍和跌倒风险高度相关。反馈系统可用于监控康复进程。

帕金森病患者：检测特征性步态异常（如步幅缩短、步频增快、冻结步态发生时的压力模式突变）和姿势不稳相关的 COP 参数变化（如前后向动摇加剧）。

骨关节炎患者：评估膝关节或髌关节疼痛对步态和负重模式的影响（如减轻患侧负荷导致的不对称）。

认知障碍患者：探索认知功能下降与姿势控制、步态自动化的生物力学关联。

5 临床应用场景与实施路径

5.1 跌倒风险筛查与分层

场景：社区健康体检、老年科门诊、养老机构入院评估。

实施：

1. 使用便携式压力平台或简易鞋垫系统进行快速静

态站立（睁眼/闭眼）和短距离行走测试。

2. 分析核心参数（COP 摆动速度/面积、步速、步长变异性、左右对称性）。

3. 结合算法模型输出风险等级（低/中/高），指导后续管理。

5.2 平衡功能障碍的精准诊断与康复方案制定

场景：康复医学科、神经内科、骨科门诊。

实施：

1. 利用高精度平台进行详细步态分析和动态平衡测试。
2. 识别特定损伤模式（如帕金森冻结步态的前足推进不足、卒中后患侧负重逃避）。

3. 基于精确诊断，制定个性化康复目标（如增加患侧负重、改善推进力）并选择针对性训练（结合生物反馈）。

6 结语

足底压力反馈系统通过量化足底生物力学特征，为老年人跌倒风险提供了客观、动态、可干预的评估新范式。足底压力反馈系统可客观量化跌倒风险（优于传统量表）。精准识别异常步态模式，指导个性化干预（如鞋垫、平衡训练）。适用于老年人、神经疾病患者、糖尿病足高危人群，降低跌倒相关并发症。推荐应用场景：康复科、老年医学科、内分泌科（糖尿病足筛查）、神经内科（帕金森/卒中步态分析）。其融合传感技术、数据处理与实时反馈的优势，不仅提升了风险评估的准确性，还开辟了“评估-反馈-训练”一体化的预防路径。随着技术成本下降与 AI 算法优化，该系统有望成为社区及家庭老年人跌倒防控的核心工具，对实现“主动健康老龄化具有重要意义”。

参考文献

- [1] 王洋,邢慧敏,谭寅虎,等. 运动-运动双任务训练在缺血性脑卒中患者跌倒效能中的应用效果[J]. 慢性病学杂志, 2025, 26 (02): 213-216.
- [2] 任越. 跳伞运动半蹲式着陆技术特征分析及功能性训练效果实证研究[D]. 首都体育学院, 2024.
- [3] 游贵宣. 不同治疗方式治疗距腓前韧带损伤的步态研究[D]. 西南医科大学, 2024.
- [4] 齐悦. 探戈舞锻炼对中年女性平衡能力的影响研究[D]. 西安体育学院, 2024.
- [5] 谈笑. 老年人足部特征及老年鞋设计要素分析[J]. 中国皮革, 2024, 53 (01): 71-74.
- [6] 张曦元. 人体易跌倒行为的生物力学研究[D]. 南京航空航天大学, 2023.
- [7] 郭树兴. 基于“筋柔骨正”膝关节五步手法联合本体感觉训练治疗早中期膝关节骨性关节炎的临床观察[D]. 天津中医药大学, 2023.
- [8] 陈雅. 老年人平衡运动锻炼动作库构建及初步应用研究[D]. 苏州大学, 2023.