

人体姿势控制的研究综述与展望

高天意, 唐宝杰, 吴鑫源, 史一帆

华南师范大学 体育科学学院, 广东 广州 510006

摘要: 本综述探讨了人体姿势控制的研究现状及其未来展望, 尤其关注其在临床康复和运动科学领域的应用。随着全球老龄化加剧及神经系统疾病发病率的上升, 姿势控制功能障碍成为导致老年人跌倒、运动能力丧失及生活质量下降的重要因素之一。文章首先明确了动态姿势控制与动态姿势调节的概念及其关系, 研究进一步总结归纳了当前用于评估动态姿势控制的方法和技术, 包括基于运动捕捉系统的评价手段、非线性动力学分析工具、功能测试与临床量表, 以及表面肌电图。这些方法各有侧重, 能够从不同角度提供对人体姿势控制能力的深入理解。此外, 同时指出了未来研究的方向。

关键词: 姿势控制、姿势调节、评价手段、评价方法

DOI: 10.63887/fns.2025.1.4.4

引言

人体姿势控制是维持人类日常活动、运动功能及环境适应能力的核心生理机制, 其研究贯穿神经科学、康复医学与运动生物力学等多学科交叉领域。随着全球人口老龄化进程加速和神经系统疾病发病率显著上升, 姿势控制功能障碍已成为导致老年人跌倒、运动能力丧失及生活质量下降的关键诱因。世界卫生组织数据显示, 跌倒已成为全球 65 岁以上老年人意外死亡的首要原因。同时随着竞技体育科研的精细化发展, 使得人体姿势控制的研究更加深入, 基于这一现状动态姿势控制研究在运动康复、运动科学领域的应用价值愈发凸显。基于此, 本研究通过系统文献综述方法, 重点解决三个研究问题: (1) 明确动态姿势控制与调节的概念, 明确其生物力学特征与神经调控机制的差异。(2) 总结归纳关于动态姿势控制与调节的评价手段与方法。(3) 基于现有的研究成果, 提出动态姿势控制研究在运动康复、运动训练领域未来发展方向。

1 动态姿势控制与动态姿势调节的界定

动态姿势控制是指在身体运动时保持稳定性的能力, 通过整合生物力学和生理学机制来调控不同情境下人体的平衡和协调。从本质上看, 动态姿势控制包括来自视觉、前庭和本体感觉系统的感觉输入的整合, 促进身体在运动过程中的控制机制。动态姿势控制在

运动训练以及日常活动中都至关重要。因此, 动态姿势控制可定义为在动态变化的环境下保持身体稳定性和执行协调运动的能力^[1]。

动态姿势调节则是实现有效姿势控制的具体过程或策略。中枢神经系统对身体姿势的快速响应, 运用前馈和反馈两种不同的神经肌肉控制机制, 根据干扰时间点可以划分为预期姿势调节与补偿姿势调节。预期姿势调节由前馈调控, 这种机制发生在干扰之前, 中枢神经系统通过预测即将发生的扰动, 预先激活相关肌肉以维持或调整姿势。这种方式依赖于先前的经验或对环境的理解, 是一种预防性的措施。预期姿势调节对于在需要平衡的活动中的熟练表现至关重要, 其中运动模式可以根据预期的外力进行调节。补偿姿势调节由反馈调控, 当身体受到外部扰动后, 中枢神经系统利用从感官系统接收到的信息来做出反应, 通过调整肌肉活动来恢复或维持平衡。这是一种基于实际感觉输入进行调整的响应性措施。

2 关于人体姿势控制的评价手段与方法

三维运动捕捉系统通过多个光学相机计算人体关节的 3D 位置, 广泛应用于步态分析、运动学研究和康复训练中。可利用多摄像头同时准确测量多个关节的角度和运动, 而被试者在有和没有脊柱矫形器的情况下执行任务。利用动作捕捉系统可有效提供关节运动

学与动力学的详细分析的能力。同时,结合动作捕捉,测力台通过测量地面反作用力和压力中心位移,在理解姿势控制方面发挥着关键作用。便携式测力板在临床环境中用于评估姿势稳定性的实际应用,验证了它们与传统安装板相比的有效性。便携式技术的这种进步使实验室环境之外的临床评估具有更广泛的可及性。Verrel 等人的研究中所见,其中运动学和力数据都用于评估姿势,这种综合方法可以全面了解在保持平衡和稳定性方面起作用的机械力。最后,惯性测量单元通过加速度计、陀螺仪和磁力计测量身体各部分的运动数据,具有高度便携性和实时性,可与三维动作捕捉系统结合广泛应用于步态分析、下肢假肢评估、康复训练等领域^[2]。

MSE 提供了一个全面的框架来评估姿势摇摆的复杂性和可变性,揭示了传统线性测量可能忽视的见解。学者研究强调了 MSE 与动态姿势控制之间的关系,通过 MSE 测量的复杂性增加与更好的姿势稳定性相关。MSE 在姿势控制分析中的主要优势之一是它能够量化站立和动态运动过程中涉及的感觉运动反馈机制。Liau 等证明步行速度的改变会影响压力中心信号的 MSE,这表明更高的步行速度会刺激更复杂的姿势控制策略。当前研究强调了基于小波技术在评估与姿势控制系统相关的运动学参数方面的整合,揭示了该技术在提高这些系统的精度和响应能力方面的潜力。小波分析与机器学习算法相结合,可以增强对姿势控制中准确预测髋关节轨迹所必需的骨盆运动特征的识别。小波变换已被证明可以有效地从动态运动中收集的数据中提取时频特征。小波神经网络在不确定的非线性系统中,这些网络利用了小波的空间和时间优势,为动态行为建模提供了强大的框架。克服了传统静态模型带来的挑战。小波神经网络的学习速度超过了传统神经网络,使其有利于姿势和运动跟踪的实时应用。基于小波的算法的适应性不仅提高了控制器的动态响应,而且最大限度地减少了与输入约束相关的限制。

动态姿势控制是平衡的一个关键方面,Y 平衡测试及其变式星际偏移平衡测试,已被公认为评估此类控

制的有效措施。YBT 通过不同方向的到达距离帮助量化动态平衡,已被验证为动态姿势控制的可靠指标。但理想情况下,它应该辅以额外的姿势稳定性测量,Berg 平衡量表或本体感觉测试,以提供对个人平衡能力的整体评估。动态步态指数,它侧重于评估移动任务期间的动态平衡,并已显示出在跌倒风险评估中的实用性。这与表明量身定制的康复干预措施可以显著改善高危人群的姿势控制和整体平衡的研究结果一致。Tinetti 平衡与步态量表包括平衡和步态两部分,满分 28 分,用于老年人跌倒风险评估;计时起立-步行测验:测量从坐姿到行走并返回的时间,简单易行,广泛应用于平衡及跌倒风险评估;特异性活动平衡自信量表:通过问卷形式评估完成日常任务的信心,满分 100%,适用于评估跌倒恐惧。Brunel 平衡量表:专为脑卒中设计,分为坐位、站位和行走三大领域,满分 12 分,具有良好信效度。功能性步态评价:改良自 DGI,增加难度项目,满分 30 分,有效避免天花板效应,适用于多类人群。平衡评价系统测试:综合多个量表,从多方面评估平衡障碍,包含 36 项任务,满分以百分比表示,具有良好的效度。

表面肌电图是了解姿势控制的宝贵工具,尤其是在受各种肌肉骨骼和神经系统疾病影响的人群中。研究表明,预期姿势调节通过让身体为姿势障碍做好准备来保持姿势至关重要,这可以通过来自参与姿势控制的肌肉信号来测量。慢性腰痛患者在腹横肌和腰多裂肌中表现出改变的激活模式,这对于在姿势调整期间稳定脊柱至关重要。运动肌贴在增强慢性腰痛患者的预期和代偿姿势控制方面的作用,表明特定的干预措施可以改变肌肉激活并提高整体稳定性。此外,关于使用表面肌电进行康复的各种干预措施疗效的研究强调了定制策略的重要性,这些策略可以增强肌肉募集和协调,最终提高姿势稳定性。通过上述评价姿势控制的评价手段与方法,总结各个手段的评价指标如表 1 所示^[3]。

表 1. 运动捕捉系统在动态姿势控制中的评价指标

测定技术	核心指标	描述
三维动作捕捉系统	步长时间	单步从足跟着地到另一侧足跟着地的时间间隔，反映步态节奏。
	支撑时间与摆动时间	单腿触地期与悬空期的比例，用于评估平衡能力。
	矢状面关节角度	髋、膝、踝关节的屈伸角度。
IMU(惯性测量单元)	质心位移与速度	反映身体重心控制能力。
	加速度范围	三轴加速度的极差值，反映姿势调整幅度。
	均方根值	加速度信号的均方根，量化整体摇摆强度。
测力台	样本熵	评估加速度信号的时间序列复杂性，SE 降低提示姿势控制能力退化。
	COP 轨迹长度	COP 移动总距离，长度增加提示稳定性下降。
	包络面积	COP 轨迹的 95%置信椭圆面积，反映静态平衡控制范围。
表面肌电 (sEMG)	地面反作用力	垂直 (FZ)、前后 (FY)、侧向 (FX) 力的峰值与曲线特征，用于步态异常分析。
	平均肌电值	反映肌肉激活水平，用于评估特定动作中肌肉的参与程度。
	最大自主收缩百分比	动态作业中肌肉负荷的量化指标。
	平均功率频率和中位频率	频谱左移 (频率下降) 提示肌肉疲劳。
	Lempel-Ziv 复杂度和 Kolmogorov 熵	复杂度降低反映肌肉收缩同步性增加，提示中枢神经系统协调策略改变。
	确定性线段百分数	信号规则性增加与疲劳进程相关。

3 应用研究及未来展望

在影响因素研究方面，影响动态姿势控制的关键因素之一是感觉输入的相互作用，包括视觉、前庭和体感系统。姿势控制依赖于来自这些来源的综合信息，因此连续的反馈协调神经肌肉动作以维持平衡。未来在运动康复及运动训练等领域，应重点探讨神经退行性疾病到运动损伤对动态姿势控制的影响，以及儿童不同发育阶段、不同年龄段老年人动态姿势变化的长期追踪，需建立统一的生物力学评价框架，揭示共通的神经代偿机制探究其内部原理机制。为设计后续干预方案提供理论支撑^[4]。

通过对上述评估手段与测量方法的总结发现，除了完善评价工具与方法的精细化外。未来研究中应结合人工智能技术，以提高动态姿势控制评估的精确性和个性化水平。应大力发展利用机器学习算法处理来

自三维动作捕捉系统、测力台和表面肌电图等设备的数据。也可以在不同项目中构建实时反馈系统，采用计算机视觉技术，应用 AI 算法进行姿态分析和错误检测。建立预测模型来预测特定运动损伤患者的恢复进程及可能遇到的问题。这些模型可以基于大量历史数据，通过 AI 技术预测最佳康复路径。还可以将 AI 与虚拟现实技术相结合，创建高度仿真的训练环境，模拟各种复杂场景下的姿势控制挑战。这不仅有助于更真实地评估个体的姿势控制能力。对于干预效果研究，当前研究重点关注单一训练对动态姿势控制的影响，对于哪种训练效果更好尚未形成共识，除了采用 meta 分析对现有研究综合评价外，应研究多种训练手段在不同环境下对动态姿势控制的影响，是否比单一训练效果更加优异^[5]。

参考文献

- [1] 肖美娜, 姜传银. 全身振动训练的国内外应用研究进展、热点及展望[J/OL]. 中国组织工程研究, 2025, 1-13.
- [2] 葛瑞东, 何佳欣, 高蓓瑶, 等. 防跌倒综合训练对老年帕金森病患者早期姿势控制障碍的影响[J]. 中国康复医学

杂志, 2025, 40 (06) : 847-854.

[3] 付倩, 闫晓芹, 王疆娜, 等. 动作任务与认知任务干扰对老年人下楼梯行走身体动态稳定性的影响[J]. 医用生物力学, 2025, 40 (02) : 316-322.

[4] 徐钊强, 李岩, 彭嘉慧, 等. 慢性腰痛患者静止站立时躯干肌的激活特征及足底压力分布[J]. 中国康复理论与实践, 2025, (04) : 466-475.

[5] 李巍, 杨曦, 李庆光, 等. 基于深度学习的人体姿势跌倒检测算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23 (06) : 640-647.