

并联机器人在老年人动态平衡训练的应用综述

张琳¹, 王恋英^{2*}, 王茂林², 田琳娜², 王堂林², 阿牛尔古², 胡维学²

¹上海理工大学康复工程与技术研究所, 上海

²中央军委训练管理部军事体育训练中心, 北京

收稿日期: 2025年8月29日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年9月29日

摘要

并联机器人作为一种新型的平衡训练设备, 在改善老年人平衡功能方面展现出诸多潜在优势。相比于传统训练设备, 并联机器人能够通过提供多自由度动态扰动。然而, 对于老年患者而言, 目前缺乏足够的证据表明, 采用并联机器人进行平衡训练能够减少其跌倒次数及几率, 主要原因在于老年患者的样本量不足, 并且样本选择不科学。所以, 需要进行更多高质量研究, 以进一步确定在并联机器人上开展平衡训练能够有效降低老年患者的跌倒风险。本文旨在通过文献综述, 探讨老年人群, 包括不同病症的老年患者或健康老年人, 在使用并联机器人训练之后其动态平衡能力的增强效果。本综述采用系统的方法, 检索了2013年12月至2025年1月期间与平衡训练设备、并联机器人、老年人和跌倒相关的文章, 通过相关关键词限制, 如研究对象、实验目的与训练条件等, 将研究方向分为硬件研究和软件研究两部分, 涵盖了应用环境、测力板、仿真分析等分类。

关键词

并联机器人, 动态平衡, 平衡训练, 老年人群

A Review of the Application of Parallel Robots in Dynamic Balance Training for the Elderly

Lin Zhang¹, Lianying Wang^{2*}, Maolin Wang², Linna Tian², Tanglin Wang², Aniurgu², Weixue Hu²

¹Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Military Sports Training Center of the Central Military Commission Training Management Department, Beijing

Received: August 29, 2025; accepted: September 22, 2025; published: September 29, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张琳, 王恋英, 王茂林, 田琳娜, 王堂林, 阿牛尔古, 胡维学. 并联机器人在老年人动态平衡训练的应用综述[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(5): 560-568. DOI: 10.12677/met.2025.145056

Abstract

The parallel robot, as a new type of balance training device, demonstrates numerous potential advantages in improving the balance function of the elderly. Compared with traditional training devices, the parallel robot can provide multi-degree-of-freedom dynamic disturbances. However, for stroke patients, there is currently a lack of sufficient evidence to show that using parallel robots for balance training can reduce the number and probability of their falls. The main reasons lie in the insufficient sample size of stroke patients and the insufficiently scientific sample selection. Therefore, more high-quality research is needed to further determine that conducting balance training on parallel robots can effectively reduce the risk of falls in stroke patients. This article aims to explore, through a literature review, the enhancement effect of dynamic balance ability in the elderly population, including elderly patients with different diseases or healthy elderly people, after training with parallel robots. This review adopted a systematic approach to retrieve articles related to balance training equipment, parallel robot, the elderly, and falls from December 2013 to January 2025. Through restrictions on relevant keywords, such as research subjects, experimental purposes, and training conditions, the research directions were divided into two parts: hardware research and software research. It covers classifications such as application environment, force measurement plates, and simulation analysis.

Keywords

Parallel Robot, Dynamic Balance, Balance Training, The Elderly Population

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着老年人群年龄增长与身体机能衰退, 跌倒成为了威胁老年人安全的首位问题。由于老年人的身体机能下降, 躯干肌群损害[1] [2]、中枢神经系统的多功能减退[3] [4]等因素可直接导致平衡能力减弱, 进一步造成老年人关节损伤、残疾, 甚至死亡[5]。研究统计, 约有 1/3~1/2 的 65 岁以上老年人每年至少会经历一次跌倒[6], 极大地影响了老年人健康, 甚至于全球的医疗成本[7]。经历过跌倒的老年人可能会引起脑卒中[8]、髌部骨折[9]、神经系统受损[10]等问题, 同时, 由于跌倒会危及老年人的生命安全, 在跌倒后的老年人可能会引起跌倒恐惧、认知功能与感知障碍, 从而增加其跌倒风险, 使其活动进一步受限[11]-[13]。因此, 老年人需要增强其平衡能力以预防跌倒, 降低受伤的可能性。而动态平衡相较于静态平衡更具挑战性, 能更贴近日常生活中所需要的平衡能力, 全面地提升老年人的功能性平衡, 降低跌倒风险, 并增强日常生活中的安全性和自主性[14]。

在增强平衡能力方面, 传统平衡训练设备如泡沫垫、BOSU 球[15]、Wii 平衡板[16]等可以通过星型偏移平衡测试[17]与起立 - 行走测试[18]帮助老年人进行平衡训练, 其简单设计及直观操作对于老年人康复和预防跌倒具有重要作用。但传统平衡训练设备具有平衡不可控性, 无法对于患者的意外扰动进行设置, 且不具备多自由度和动态调整功能, 较容易发生安全问题。一项系统综述指出, 相比于智能化、可增加扰动的平衡训练设备, 传统的平衡训练设备具有缺点, 无法对于外部或意外的平衡扰动做出反应, 需要较多的训练次数, 无法保持训练效果[19]。平衡训练虽有实际应用性, 但无法提供实时反馈、记录老年人的平衡状态与进步情况, 缺乏了多样性和个性化。

对于可增加扰动的平衡训练设备而言，并联机器人是增强老年人平衡能力的智能化平衡训练设备之一，可以通过提供不稳定的表面，迫使患者在站立或运动时更多地依赖于肌肉力量和神经反应来保持平衡。已有研究表明，前庭功能障碍患者可以通过平衡训练降低跌倒风险，是改善前庭功能丧失后姿势控制的有效干预措施[20]。同时，由于神经功能的减退，老年人极易造成关节损伤。有研究显示，通过并联机器人进行平衡训练可以通过控制神经肌肉缓解踝关节患者的损伤，进一步增加功能不稳定踝关节的可靠性，促进踝关节康复，提高平衡能力[21]。

本综述主要探究老年人群在使用并联机器人训练之后其动态平衡能力的增强效果。根据关键词和限定范围对于文章质量进行检索、筛选、质量评估及数据提取，接着，本综述对于主要研究方向进行大类分类，将检索之后的文章分为硬件研究与软件研究，最后，对于大类分类的两类研究从环境、测力板、临床实验等部分进行详细的分类，并做出讨论与总结。

2. 文献检索与质量评估

2.1. 检索策略

本研究按照 PRISMA 指南进行系统撰述[22]。数据库检索于 2013 年 12 月至 2025 年 1 月期间在 Web of Science、PubMed 中进行。第一次检索在 Web of Science 数据库中进行，第二次检索在 PubMed 数据库中进行。搜索中将受限于文本可用性，出版日期、文章类型、语言、数据库。具体搜索关键词与结果如表 1 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 标准试验系统结果数据

检索软件	关键词	检索数量
Web of Science	TS = dynamic balance training AND TS = equipment OR TS = instable platform OR TS = perturbation platform OR TS = parallel platform AND TS = elderly	3470
PubMed	(((((dynamic balance training) AND (equipment)) OR (instable platform)) OR (perturbation platform)) OR (parallel platform)) AND (elderly)	124

2.2. 方法质量评估

在平衡训练中，常用物理治疗证据数据库(PEDro)量表进行质量评估[23]。但由于本研究在于平衡训练设备，无法实践于物理治疗中，因此，本研究采用自行设计的质量评估表对于研究质量进行评估。

本研究中，通过 Web of Science 与 PubMed 数据库检索，共检索为 3563 篇。PRISMA 流程图(如图 1)，经过标题与摘要的筛选，共纳入 52 篇。其中一些文章是根据参考文献及作者跟踪纳入的。再经过进一步的筛选排除，本综述共纳入 16 项研究。

2.3. 纳入研究的方法学质量

本综述共纳入 16 项研究[14][24]-[38]，共涉及了 10 种基于并联机器人的平衡训练设备。由于本综述共含有并联机器人设计与仿真控制两个方面的研究，所以本综述将该两部分研究分别命名为硬件研究与软件研究。其中，只有 2 项研究未进行应用环境的描述[25][37]，有 4 项研究是在虚拟环境下进行的[26][27][29][30]，有 9 项研究对于其测力板进行了介绍[14][24][27][28][31]-[35]。对于对比实验而言，有 1 项研究针对于应用环境进行了对比[27]；有 6 项研究针对于研究对象进行了对比[25][31]-[33][36][37]，该对比实验均为临床实验。所有研究均是以康复为条件进行的。

如表 2 所示，被纳入综述的研究中，Stewart [25][26][30][31]与 IsiSkate [37]是最常被应用于并联平衡机器人实验的仪器，共有 9 项实验介绍了其自由度[14][25][26][30]-[33][37][38]，8 项实验介绍了其传感器[14][24][26][28][30][34]-[36]，传感器可嵌入测力板内或穿戴于患者身上，以便测量其中的受力、加速

度、肌电等数据。本研究中最常被使用的传感器为 IMU 惯性传感器，可以测量站立于并联平衡机器人上的用户的加速度、角速度等动态数据。此外，共有 9 项研究对于其算法进行了描述[26] [28] [29] [31] [32] [35] [36]，只有 1 项研究没有进行仿真分析[25]，所有研究都对于设备进行了临床或仿真实验。

Table 2. Key characteristics of the included studies
表 2. 被纳入研究的关键特点

No.	作者(年份)	传感器类型	参与者特征	算法	仿真/数据分析	机器人类型	实验
1	Giorgia (2022)	力/IMU	健康老年人/年轻人	N	姿势性摇晃	Hunova	Y
2	Zrinka (2017)	N	健康年轻人	N	N	Stewart	Y
3	Yuan (2022)	IMU	N	最优时间轨迹规划	逆运动学	Stewart	Y
4	Liu (2015)	N	健康老年人	N	个体差异/运动学/动力学	Mobile Platform/ Nordick	Y
5	Ma (2014)	加速度	N	路径跟踪/轨迹规划	倒立摆	IsiSkate	Y
6	Shoval (2023)	位置	N	N	运动学	EPES	Y
7	Meghan (2020)	N	健康老年人/年轻人	差异/同跟最大距离	运动学/多目标控制	V-gait	Y
8	Rocco (2019)	加速度	帕金森患者	N	数据统计	Caren (Stewart)	Y
9	Maarten (2018)	N	健康老年人/年轻人	卡尔曼平滑法	运动学/动力学/ 倒立摆	Caren (Stewart)	Y
10	Lars (2014)	N	帕金森患者/健康人	N	运动学/动力学	两轴机器人平台	Y
11	Joshua (2022)	N	Stroke	阻抗控制/轨迹规划	扭转分析	两轴机器人平台	Y
12	Haissam (2021)	加速度	健康年轻人	N	倒立摆	IsiSkate	Y
13	Naceur (2018)	力	老年人/中风患者	Welch	稳定图扩散分析	IsiSkate	Y
14	Ilaria (2019)	加速度	老年人/年轻人	轨迹规划/ 快速傅里叶变换	数据分析	RotoBit	Y
15	Gao (2019)	N	N	单条曲线/轨迹规划/ 避免奇点	逆运动学	3-RRR 平面 并联机构	Y
16	Farahnaz (2023)	N	年轻人	算法实时检测	数据分析	Caren (Stewart)	Y

3. 并联机器人系统研究

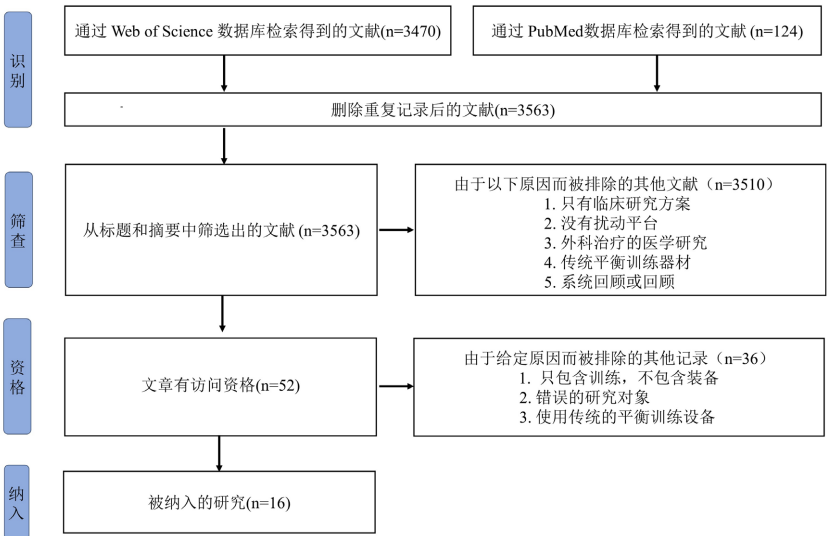


Figure 1. PRISMA flow diagram
图 1. PRISMA 流程图

本综述中,从并联机器人系统的角度而言,可将文章所述的相关内容分为硬件研究与软件研究。硬件研究侧重于调研现有并联机器人的机械设计及优化,通过引入不同形式的扰动,增强人体在动态平衡训练设备中训练期间的抗干扰能力,而不涉及算法分析。软件研究侧重点在于优化平衡系统的控制算法与仿真分析,确保并联机器人能够有效地实现其设计功能,帮助设备在面对不同类型和强度的扰动时,快速响应并保持稳定性,从而提高设备的性能及可靠性。

3.1. 硬件研究

在硬件研究中,Zrinka [25]与 Yuan [26]等人采用了 Stewart 平台作为机器人平台。Stewart 平台(图 2)由一个可移动平台、一个固定底座和 6 个拓展的驱动器组成,6 自由度的 Stewart 平台应用广泛,因为其可以模拟 6 轴或自由度的扰动变化,帮助受试者在应用环境中能够进行更加多样化的运动。Stewart 平台能够在三个平移轴(X、Y、Z)和三个旋转轴(绕 X、Y、Z 轴的旋转)上进行运动,有助于精确模拟和调节机器人在多种姿态下的运动和稳定性。通过精确的运动控制,平台可以用于模拟各种动态平衡场景,例如模拟倾斜、振动等对于机器人稳定性有影响的动态条件。同时,与 Liu 等人[27]所提出的移动平台与 Nordick 跑步机构成新型并联机器人、Meghan 等人[29]所应用的 V-gait 虚拟现实系统类似,Stewart 平台也可以与跑步机、各种虚拟现实设备结合进行同步控制,模拟各种地形和障碍物,并能模拟出移动障碍物的速度。



Figure 2. Six-degree-of-freedom Stewart platform
图 2. 六自由度 Stewart 平台

由于 Rocco [30]、Maarten [31]与 Farahnaz [38]等人使用的 Caren 系统是一种基于 Stewart 平台所创建的设备,其与 6 自由度的 Stewart 平台所具备的功能类似。平台也可以通过液压驱动器提供旋转和平移运动,实时调整平台的姿态和位置,模拟复杂的运动和环境条件,以适应不同的测试需求,是一种适用于平衡研究的设备。CAREN 系统的站立面积为 3.1 m^2 ,其步行距离至少为 1 m ,为各种平衡训练提供充足的空间。但对于短持续时间的坡道,Caren 系统没有达到目标速度。此外,由于 Caren 系统的平台存在机械约束,易引起不良位移,可以通过动态校正减少位移,增加患者运动时的稳定性与舒适性。

此外, Ma [28]、Haissam [34]与 Naceur [35]等人采用的 IsiSkate 平台也是常用于平衡训练的机器人平台之一。与 Stewart 平台与 Caren 系统一样,IsiSkate 平台致力于研究动态平衡,并通过绑缚于腹部和小腿前端的力传感器与传感器测量用户运动中的力与加速度。在机械部分,IsiSkate 由其专用测力板与四个动力模块组成。测力板由两个相同的半板组成,半板上装有相应的力传感器。此外,本综述中,在机械部分,Hunova 平台作为医疗机器人设备含有两个机电平台,同时含有 IMU 惯性传感器以检测用户的躯

干运动。RotoBit 平台由伺服电机、增量式编码器、齿形带、减速机和聚乙烯旋转盘组成。与 Hunova 平台一样, RotoBit 平台也含有 IMU 惯性传感器, 但除了躯干运动, RotoBit 平台也可用于收集骨盆和头部的运动学数据。

除了上述已被推广的并联机器人平台, Lars [32]与 Joshua [33]等人所分别建立的双轴机器人平台用于治疗帕金森与脑卒中人群的姿态平衡。前者所提出的机器人平台由伺服控制[32], 后者机器人平台的双独立轴由两个相互垂直的电机设计, 由于其旋转扰动的能力较强, 其电机的扭矩也较大[33]。Shoval 等人[14]所创建的 EPES 系统也由两个直流电机及椭圆运动平台组成, 系统通过在椭圆步行过程中提供意外的干扰来改善反应性平衡能力。在安全的环境下, 该机器人平台可以通过设备中的相机明确用户的位置和身体角度, 从而创建每个患者所需的扰动。

3.2. 软件研究

在该综述的软件研究中, 可分为仿真分析与控制算法两部分。在平衡训练的应用场景下, 并联机器人的正逆运动学分析可以有助于模拟多自由度的复杂运动, 其中逆运动学分析能够优化机器人的运动路径和姿态调整。通过计算所需的关节动作, 可以优化机器人的运动设计, 从而提高训练效果和设备的稳定性, 确保在实际训练中机器人能实现所需的运动模式。

倒立摆也是本综述中较为应用多的仿真分析方法。人体站立力学近似于以踝关节为中心的倒立摆行为, Ma 等人[28]使用的单自由度倒立摆是一种简化的人体模型, 常被用于评估平衡稳定性。但随着姿势摆动频率的增加, 具有分布质量惯性的倒立摆模型(即多自由度的倒立摆模型)比集中于身体质心的质量惯性倒立摆模型(即单自由度的倒立摆模型)更能准确地反映了人体的实际负荷。所以在单自由度倒立摆模型的基础上, Haissam 等人[34]采用了三自由度的倒立摆模型, 通过四个三轴加速度计计算得出倒立摆模型中的关节角度。实验证明, 使用三自由度倒立摆模型所得出的关节角度误差较小, 能更稳定地模拟人体的三维姿势。

尽管单自由度和多自由度倒立摆模型在评估平衡稳定性中各有其独特的优点, Ilaria 等人[36]采用的光谱分析与稳定图扩散分析(SDA)法在并联机器人的仿真分析中可以提供更深入的姿势平衡训练。该研究通过使用光谱分析和稳定图扩散分析(SDA), 探究不同干扰对姿势行为的影响, 并分析评估工具以区分不同的姿势行为。其中, 光谱分析通过计算功率谱密度来提供有用的功率和频率结构信息, 用于评估姿势的频率特征。稳定图扩散分析(SDA)被用来研究不同级别和类型的扰动对压力中心(COP)动力学的影响。通过这两种分析方法, 可以更全面地了解姿势控制过程, 并帮助区分患有姿势障碍的患者。

在仿真分析的基础上, Yuan [26]、Ma [28]与 Gao [37]等人使用的轨迹规划的控制算法有助于精确机器人沿特定路线移动。Yuan 等人[26]在平衡训练机器人中应用了最优的加速度变化规划算法, 以实现加速度的连续变化。同时, 文章还介绍了将轨迹规划转化为非线性优化问题的方法, 并提出了三种优化目标: 最优时间轨迹规划、最优能量轨迹规划和最优加速度变化规划。

在评估并联机器人的路径跟踪性能与精度上, Ma 等人[28]先通过运动捕捉系统(MoCap)通过测量平台的绝对位置来验证位置传感器测量的数据, 再基于运动学建模的方法创建理想路径, 最后通过比较理论计算的路径、位置传感器测量的路径和运动捕捉系统测量的路径, 评估了平台的路径跟踪精度。但实验表明, 由于失去了部分抓地力, 会出现一些微小的扰动和误差。

在轨迹规划中, 面对奇异点引起的运动学或动力学问题, 应对策略可以分为避开奇异点、处理奇异点与优化算法三方面。Gao 等人[37]通过引入冗余自由度和转换工作模式避免已知的奇异点, 也提出了基于人工势函数与定义平滑流形的策略来计算无奇异点的路径, 尽量避免轨迹在奇异点附近产生剧烈的变化。

4. 结果与讨论

本综述的目的为体现并联机器人对于老年人而言在动态平衡训练中的应用。在本综述研究中, Stewart 平台、Caren 系统和 IsiSkate 平台等机器人平台被广泛应用于平衡训练和动态模拟。Stewart 平台由于其六自由度的设计,能在三个平移轴和三个旋转轴上运动,帮助精确模拟动态环境。Caren 系统是基于 Stewart 平台的设备,提供了较大的操作空间和高精度的动态平衡模拟,而 IsiSkate 平台则通过力传感器测量用户运动中的力与加速度。其他如 Hunova 和 RotoBit 机器人平台也在用户的平衡训练中发挥了作用。而自主研发的双轴机器人平台、EPES 系统和 3-RRR 平面并联机器人,则提供了不同的运动和稳定性测试方案。

硬件研究提供了并联机器人的理论设计和操作平台,而其软件研究涉及的控制算法和数据处理能够更高效地实现控制和优化。本综述软件研究分为仿真分析和控制算法两部分,在仿真分析中,正逆运动学分析被用于模拟并联机器人复杂的运动行为,并优化其运动路径;倒立摆的多自由度模型被广泛应用于评估平衡稳定性,能够更准确地反映人体负荷的动态变化;光谱分析和稳定图扩散分析(SDA)被有效实施于探讨扰动对姿势控制的影响。而在控制算法方面,轨迹规划、奇异点处理策略及其他控制优化算法(如最优加速度规划和基于运动捕捉系统的路径跟踪评估)则致力于提高机器人平台的性能与稳定性。

在并联机器人的研究中,实验研究在硬件研究与软件算法的设计的整合过程中发挥了关键作用。通过实验数据,能够验证并联机器人的硬件性能,并与软件算法进行交互,该验证与交互能够确保理论模型的准确性,并优化其控制策略,从而提升整体系统的性能和可靠性。本综述所纳入的 13 项实验研究共涵盖 478 名参与者,结果显示并联机器人训练可显著降低健康老年人及帕金森患者的跌倒风险。然而,在脑卒中患者中该类系统的有效性仍存争议,现有证据尚不足以得出明确结论。这一差异可能源于疾病病理机制的根本不同。帕金森病以基底节功能退化和节律性运动控制障碍为主,其运动模式较适合通过结构化、重复性的机器人扰动进行训练,而脑卒中后常出现感觉-运动整合失调、单侧忽略或特定神经通路中断,导致患者对称性、高频率动态扰动的响应能力下降,甚至因任务复杂度超出代偿范围而产生消极适应。此外,既有的脑卒中研究中普遍存在样本量较小、干预方案异质性高(如扰动形式、强度、持续时间差异显著)及个体功能基线不一致等问题,极大限制了结论的可靠性。

未来研究应致力于开展更多大样本、多中心、长期随访的高质量随机对照试验,尤其需注重根据卒中类型、损伤阶段及功能缺损特点对人群进行分层设计。在训练协议方面,应系统探索不同扰动模式与个体损伤特征的匹配关系,并发展融合实时生心理反馈的自适应控制策略,从而实现真正意义上的个体化康复干预。

尽管本研究对并联机器人在老年平衡训练中的应用进行了系统回顾,但仍需正视若干局限性。现有文献多集中于健康老年人及帕金森患者,对脑卒中及其他神经系统疾病的研究仍较有限,限制了结论的泛化能力。其次,长期效应证据缺乏,难以评估训练效果的持续性与迁移性。第三,目前尚未建立统一的扰动分类与强度标准,不同研究间干预参数和结局指标差异较大,可能导致结果合并与解读时的偏倚。今后的研究应着力推动标准化评估与训练框架的建立,同时拓展更多针对不同疾病人群的高质量研究,以全面确立并联机器人在临床康复中的应用价值。

5. 结论与展望

研究发现,并联机器人已有相当数量,从自由度、应用环境、测力板配置等方面均有一定的显著进展。并联机器人为老年人提供了一种有效的康复工具,能够通过模拟复杂的运动环境和动态调节,改善患者的平衡能力、步态和姿势控制,从而达到更好的康复效果。但由于大部分研究的偏向性与局限性,需要通过对于并联机器人在脑卒中患者的大样本实验中进行检测,以确保其广泛适用性及疗效。

参考文献

- [1] Yoo, S.D., Jeong, Y.S., Kim, D.H., *et al.* (2010) The Efficacy of Core Strengthening on the Trunk Balance in Patients with Subacute Stroke. *Annals of Rehabilitation Medicine*, **34**, 677-682.
- [2] Karatas, M., Çetin, N., Bayramoglu, M. and Dilek, A. (2004) Trunk Muscle Strength in Relation to Balance and Functional Disability in Unihemispheric Stroke Patients. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **83**, 81-87. <https://doi.org/10.1097/01.phm.0000107486.99756.c7>
- [3] Li, L., Wang, Y., Yan, J., Chen, Y., Zhou, R., Yi, X., *et al.* (2011) Clinical Predictors of Cognitive Decline in Patients with Mild Cognitive Impairment: The Chongqing Aging Study. *Journal of Neurology*, **259**, 1303-1311. <https://doi.org/10.1007/s00415-011-6342-0>
- [4] Eskildsen, S.F., Coupé, P., García-Lorenzo, D., Fonov, V., Pruessner, J.C. and Collins, D.L. (2013) Prediction of Alzheimer's Disease in Subjects with Mild Cognitive Impairment from the ADNI Cohort Using Patterns of Cortical Thinning. *NeuroImage*, **65**, 511-521. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.09.058>
- [5] Wang, Z., Hu, Y. and Peng, F. (2021) Long-Term Trends in Unintentional Fall Mortality in China: A Population-Based Age-Period-Cohort Study. *Frontiers in Public Health*, **9**, Article 749295. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.749295>
- [6] Chang, J.T., Morton, S.C., Rubenstein, L.Z., Mojica, W.A., Maglione, M., Suttrop, M.J., *et al.* (2004) Interventions for the Prevention of Falls in Older Adults: Systematic Review and Meta-Analysis of Randomised Clinical Trials. *BMJ*, **328**, 680. <https://doi.org/10.1136/bmj.328.7441.680>
- [7] James, S.L., Castle, C.D., Dingels, Z.V., Fox, J.T., Hamilton, E.B., Liu, Z., *et al.* (2020) Global Injury Morbidity and Mortality from 1990 to 2017: Results from the Global Burden of Disease Study 2017. *Injury Prevention*, **26**, i96-i114. <https://doi.org/10.1136/injuryprev-2019-043494>
- [8] Xu, Q., Ou, X. and Li, J. (2022) The Risk of Falls among the Aging Population: A Systematic Review and Meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, **10**, Article 902599. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.902599>
- [9] Wing, A.M., Goodrich, S., Virji-Babul, N., *et al.* (1993) Balance Evaluation in Hemiparetic Stroke Patients Using Lateral Forces Applied to the Hip. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **74**, 292-299.
- [10] Bonan, I.V., Colle, F.M., Guichard, J.P., Vicaut, E., Eisenfisz, M., Tran Ba Huy, P., *et al.* (2004) Reliance on Visual Information after Stroke. Part I: Balance on Dynamic Posturography. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **85**, 268-273. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.06.017>
- [11] Bahat Öztürk, G., Kiliç, C., Bozkurt, M.E. and Karan, M.A. (2021) Prevalence and Associates of Fear of Falling among Community-Dwelling Older Adults. *The Journal of Nutrition, Health and Aging*, **25**, 433-439. <https://doi.org/10.1007/s12603-020-1535-9>
- [12] Auais, M., French, S., Alvarado, B., Pirkle, C., Belanger, E. and Guralnik, J. (2017) Fear of Falling Predicts Incidence of Functional Disability 2 Years Later: A Perspective from an International Cohort Study. *The Journals of Gerontology: Series A*, **73**, 1212-1215. <https://doi.org/10.1093/gerona/glx237>
- [13] Scheffer, A.C., Schuurmans, M.J., van Dijk, N., van der Hooft, T. and de Rooij, S.E. (2008) Fear of Falling: Measurement Strategy, Prevalence, Risk Factors and Consequences among Older Persons. *Age and Ageing*, **37**, 19-24. <https://doi.org/10.1093/ageing/afm169>
- [14] Sade, S., Pickholz, H., Melzer, I. and Shapiro, A. (2023) Development of an Elliptical Perturbation System That Provides Unexpected Perturbations during Elliptical Walking (the EPES System). *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **20**, Article No. 125. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01251-3>
- [15] Mittermaier, C., Schindler, M., Loader, B., Waldhoer, T., Ambrozcy, C., Crevenna, R., *et al.* (2017) Unique Approach to Sensorimotor Training with a New Device Combining Air Cushion with Stochastic Translations—A Prospective Randomized Controlled Clinical Trial. *Gait & Posture*, **52**, 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.038>
- [16] Cone, B.L., Levy, S.S. and Goble, D.J. (2015) Wii Fit Exer-Game Training Improves Sensory Weighting and Dynamic Balance in Healthy Young Adults. *Gait & Posture*, **41**, 711-715. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.01.030>
- [17] Gribble, P.A., Hertel, J. and Plisky, P. (2012) Using the Star Excursion Balance Test to Assess Dynamic Postural-Control Deficits and Outcomes in Lower Extremity Injury: A Literature and Systematic Review. *Journal of Athletic Training*, **47**, 339-357. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-47.3.08>
- [18] Shumway-Cook, A., Brauer, S. and Woollacott, M. (2000) Predicting the Probability for Falls in Community-Dwelling Older Adults Using the Timed UP & Go Test. *Physical Therapy*, **80**, 896-903. <https://doi.org/10.1093/ptj/80.9.896>
- [19] Panjan, A. and Šarabon, N. (2010) Review of Methods for the Evaluation of Human Body Balance. *Sport Science Review*, **19**, 131-163.
- [20] Wrisley, D.M. and Stephens, M.J. (2011) The Effects of Rotational Platform Training on Balance and ADLS. 2011 *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Boston, 30 August-3 September 2011, 3529-3532. <https://doi.org/10.1109/iembs.2011.6090586>

- [21] Latip, H.F.M., Omar, A.H., Shahrom, A., Azmi, F. and Ridhwan, (2015) A Novel Hybrid Rehabilitation Device for Neuromuscular Control Exercise and Rehabilitation Training. *Procedia Computer Science*, **76**, 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.311>
- [22] Liberati, A., Altman, D.G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P.C., Ioannidis, J.P.A., *et al.* (2009) The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions: Explanation and Elaboration. *PLOS Medicine*, **6**, e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- [23] Zarei, H., Norasteh, A.A., Lieberman, L.J., Ertel, M.W. and Brian, A. (2024) The Impacts of Exercise Training Programs on Balance in Children with Hearing Loss: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, **37**, 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2023.11.050>
- [24] Marchesi, G., De Luca, A., Squeri, V., De Michieli, L., Vallone, F., Pilotto, A., *et al.* (2022) A Lifespan Approach to Balance in Static and Dynamic Conditions: The Effect of Age on Balance Abilities. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 801142. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.801142>
- [25] Potocanac, Z., Goljat, R. and Babic, J. (2017) A Robotic System for Delivering Novel Real-Time, Movement Dependent Perturbations. *Gait & Posture*, **58**, 386-389. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.08.038>
- [26] Yuan, F., Chen, D., Pan, C., Du, J., Wei, X. and Wang, M. (2022) Application of Optimal-Jerk Trajectory Planning in Gait-Balance Training Robot. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **35**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00665-1>
- [27] Liu, J., Lockhart, T.E., Parijat, P., *et al.* (2015) Comparison of Slip Training in VR Environment and on Moveable Platform. *Biomedical Sciences Instrumentation*, **51**, 189-197.
- [28] Ma, J., Kharboutly, H., Benali, A., Amar, F.B. and Bouzit, M. (2014) Design of Omnidirectional Mobile Platform for Balance Analysis. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **19**, 1872-1881. <https://doi.org/10.1109/tmech.2014.2309484>
- [29] Kazanski, M.E., Cusumano, J.P. and Dingwell, J.B. (2020) How Healthy Older Adults Regulate Lateral Foot Placement While Walking in Laterally Destabilizing Environments. *Journal of Biomechanics*, **104**, Article ID: 109714. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109714>
- [30] Calabrò, R.S., Naro, A., Cimino, V., Buda, A., Paladina, G., Di Lorenzo, G., *et al.* (2019) Improving Motor Performance in Parkinson's Disease: A Preliminary Study on the Promising Use of the Computer Assisted Virtual Reality Environment (Caren). *Neurological Sciences*, **41**, 933-941. <https://doi.org/10.1007/s10072-019-04194-7>
- [31] Afschrift, M., De Groote, F., Verschueren, S. and Jonkers, I. (2018) Increased Sensory Noise and Not Muscle Weakness Explains Changes in Non-Stepping Postural Responses Following Stance Perturbations in Healthy Elderly. *Gait & Posture*, **59**, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.10.003>
- [32] Oude Nijhuis, L.B., Allum, J.H.J., Nanhoe-Mahabier, W. and Bloem, B.R. (2014) Influence of Perturbation Velocity on Balance Control in Parkinson's Disease. *PLOS ONE*, **9**, e86650. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086650>
- [33] Russell, J.B., Phillips, C.M., Auer, M.R., Phan, V., Jo, K., Save, O., *et al.* (2023) Introduction to a Twin Dual-Axis Robotic Platform for Studies of Lower Limb Biomechanics. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, **11**, 282-290. <https://doi.org/10.1109/jtehm.2023.3271446>
- [34] Ma, J., Kharboutly, H., Benali, A., Benamar, F. and Bouzit, M. (2015) Joint Angle Estimation with Accelerometers for Dynamic Postural Analysis. *Journal of Biomechanics*, **48**, 3616-3624. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.08.008>
- [35] Hedjazi, N., Benali, A., Bouzit, M. and Dibi, Z. (2018) Model Identification and Evaluation of Postural Dynamics of Healthy and Post-Stroke Individuals under Unidirectional Perturbations. *Biomedical Signal Processing and Control*, **43**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.02.015>
- [36] Mileti, I., Taborri, J., Rossi, S., Del Prete, Z., Paoloni, M., Suppa, A., *et al.* (2019) Reactive Postural Responses to Continuous Yaw Perturbations in Healthy Humans: The Effect of Aging. *Sensors*, **20**, Article 63. <https://doi.org/10.3390/s20010063>
- [37] Gao, Y., Chen, K., Gao, H., Xiao, P. and Wang, L. (2019) Small-Angle Perturbation Method for Moving Platform Orientation to Avoid Singularity of Asymmetrical 3-RRR Planner Parallel Manipulator. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **41**, Article No. 538. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2012-4>
- [38] Fallahtafti, F., Bruijn, S., Mohammadzadeh Gonabadi, A., Sangtarashan, M., Boron, J.B., Curtze, C., *et al.* (2023) Trunk Velocity Changes in Response to Physical Perturbations Are Potential Indicators of Gait Stability. *Sensors*, **23**, Article 2833. <https://doi.org/10.3390/s23052833>