

可穿戴式足底压力监测系统的应用及进展

程翔¹, 郭瑞², 伍晓明², 潘钰¹

(1. 清华大学临床医学院·清华大学附属北京清华长庚医院康复医学科 北京 102218; 2. 清华大学集成电路学院 北京 102218)

摘要 可穿戴式足底压力监测系统(WFPMS)是近年来热门的足底压力分析手段。本研究重点介绍了目前WFPMS的常见类型及其在医疗健康、人体生物力学、日常生活监测等领域的应用,并对其发展方向及局限性进行了讨论,提出了基于可穿戴式技术与人工智能相结合的应用展望。

关键词 足底压力; 可穿戴系统; 人工智能; 临床应用

中图分类号 R443+8 TP23 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721(2024)02-0143-05

Application and progress of wearable foot pressure monitor system

CHENG Xiang¹, GUO Rui², WU Xiaoming², PAN Yu¹

(1. School of Clinical Medicine, Tsinghua University / Department of Rehabilitation, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, Beijing 102218, China; 2. School of Integrated Circuits, Tsinghua University, Beijing 102218, China)

Abstract WFPMS (Wearable Foot Pressure Monitor System) is a popular method to analyze foot pressure in recent years. The common types of WFPMS and its applications in medical and health care, human biomechanics, daily life monitoring and other fields were introduced and the possible development direction and limitations of WFPMS were discussed, and the possible clinical application based on the combination of wearable technology and artificial intelligence were prospected in this paper.

Key words Foot Pressure; Wearable System; Artificial Intelligence; Clinical Application

足底压力分析是步态分析中的动力学分析部分,研究的是行走或站立过程中重力或动能通过足底表面作用于接触面而产生的相对作用力。足底压力根据足底表面和接触面的作用方向不同又可分为垂直、前-后及内-外3个不同方向。足底压力分析有助于了解脚部与接触表面之间相互

作用关系,在人体步态和姿势评估的生物力学研究中有重要作用。足底压力测量手段经过一个多世纪的发展,形成了足印法、足底压力扫描法、压力板测量法、压力鞋垫等多种不同的方法^[1],按测量形式不同可分为平台式和可穿戴式^[2-3]。与传统的三维步态分析及足底压力测力台相比,

收稿日期: 2022-06-10 录用日期: 2023-07-08

Received Date: 2022-06-10 Accepted Date: 2023-07-08

基金项目: 首都医学发展科研基金(2022-2Z-2242); 清华大学精准医学科研计划(12020B7049)

Foundation Item: Capital Medical Development Research Fund(2022-2Z-2242); Precision Medicine Research Program of Tsinghua University(12020B7049)

通讯作者: 潘钰, Email: panyu@btch.edu.cn

Corresponding Author: PAN Yu, Email: panyu@btch.edu.cn

引用格式: 程翔, 郭瑞, 伍晓明, 等. 可穿戴式足底压力监测系统的应用及进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2024, 5(2): 143-147.

Citation: CHENG X, GUO R, WU X M, et al. Application and progress of wearable foot pressure monitor system[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(2): 143-147.

可穿戴系统在移动性、操作性和便捷性上更具优势,可适用于不同类型鞋类穿着下的应用场景。受试者可以在自然步态下完成数据采集,避免了因测量平台尺寸限制而产生的适应现象。因此,可穿戴式足底压力监测系统在疾病的诊断、预防、疗效评估中发挥重要作用,并被广泛应用于人体生物力学研究、日常生活活动监测、运动装备制造、跌倒预防等。

1 可穿戴式足底压力监测系统的分类

目前可穿戴式足底压力监测系统(Wearable Foot Pressure Monitor System, WFPMS)的常见类型包括袜式、鞋垫/鞋式。

袜式压力监测系统是在编织工艺阶段将导电纱线与普通纱线混纺,形成含有若干压力传感器模块的监测系统,以实现穿戴者数据的采集。鞋垫/鞋式压力监测系统是将压力传感器封装入鞋垫/鞋中,通过导线或蓝牙等传输手段将包括压力传感器在内的传感器数据和信号处理与输出模块相连接,制成监测系统。两者区别在于,袜式足底压力监测系统对足部的包裹性更好,因此其测量精度更高,对于足底压力的变化感知滞后性更低;而鞋/鞋垫式足底压力监测系统由于其具有更大的附着空间,可以搭载更多不同类型的传感器(惯性、加速度和温度等)和更大的能源及数据传输模块,在功能多样性、长时间数据采集与传输距离方面有着更大的优势^[4]。

WFPMS目前已被广泛应用于康复、运动和日常生活监测等多个领域。随着人工智能在医疗领域的应用及医工交叉研究的深入,WFPMS逐渐完善,并被应用于各类患者功能预测、疾病诊断及医疗器械的研发,成为当前研究热点。

2 可穿戴式足底压力测量设备在医疗领域的应用

2.1 糖尿病足

糖尿病足(Diabetes Foot, DF)作为糖尿病(Diabetes Mellitus, DM)最严重并发症之一,在DM患者中发病率大约为25%,患者常因肢体远端感觉异常及血液循环差导致局部溃疡、感染甚至截肢^[5]。据研究统计,全

球成人DM患者截至2019年已经达到4.25亿,预计到2045年达到6.29亿。我国DM人群高达1.14亿,居全球首位^[6]。因此,如何更好地预防、诊断、治疗DF成为研究热点。在DF预防方面,多项研究发现足底局部压力异常增高是DF和糖尿病足部溃疡(Diabetic Foot Ulcer, DFU)的主要危险因素^[7-8]。WFPMS可实时监测DM患者足底压力变化及分布,在日常生活条件下,当DM患者足底压力超过正常范围时可发出提醒^[9]。Jones P等人^[10]对DF患者鞋内压力分布的相关文献进行了回顾,同样认为异常的足底压力升高与DFU风险密切相关。黄晓玲^[11]使用Noraxon T & T鞋垫式足底压力测量系统,对77例DM患者和43例正常受试者步行下足底压力参数进行采集分析,发现在日常自然步态行走下,DM患者与正常受试者相比,在第2、3区跖骨的足底峰值压力与冲量百分比均显著升高,足跟部位冲量百分比有所下降;DF患者与DM患者相比,DF患者在中足区峰值压力与冲量百分比显著升高。该研究结果认为,应着重对跖骨部位进行减压干预,把压力从前足的跖骨部位向足跟部位转移,缓解跖骨部位的压力,从而减少DFU的发生。也有部分学者的研究发现,足底局部温度异常也是DF发病的危险因素。Yavuz M等人^[12]开发了温度-足底压力监测鞋垫(TAPMARI),用以监测DF患者步行下的足底压力和温度,通过给予不同程度的干预措施,发现控制足底局部温度和压力是预防DF患者出现DFU的有效方法。Nouman M等人^[13]使用Pedar-X[®]系统(Novel公司,德国)评估了不同材质鞋垫对DF患者在步行、爬坡等运动状态下改善足底压力分布的效果,为完善相关鞋类设计做出指导。

2.2 慢性踝关节不稳定

慢性踝关节不稳定(Chronic Ankle Instability, CAI)是一种严重影响患者日常生活及运动能力的疾病,其可以分为功能性、机械性、混合性3种类型,主要表现为踝关节反复扭伤。足底压力分析对于CAI患者十分重要,根据慢性踝关节不稳疾病的特点,动态评估才能更好地反馈其功能状态及生物力学

特征。因此，越来越多的学者通过 WFPMS 采集 CAI 患者的运动学及动力学参数，用于研究其发病机制及进展过程，预测和评估术后康复疗效。Nyska M 等人^[14]通过观察 CAI 患者各足底部解剖区域之间的峰值压力，探究此类患者行进期间足底部与接触面之间力的传导模式，研究发现 CAI 患者前足中部、外侧和脚趾下的区域达到峰值压力的时间显著延迟，足跟和足趾压力峰值相对较低，而在中足以下和前足外侧的压力峰值高于正常水平，这表明 CAI 患者在支撑相的起始和结束阶段，体重转移速度减慢且伴有明显重心横向移动。侯宗辰等人^[15]使用 Footscan 足底压力分析系统（RSscan 公司，比利时）和 Accusway Plus 压力台（AMTI 公司，美国）对 CAI 患者足底压力特征及相关因素进行分析，发现步行下慢性踝关节不稳患侧脚底压力中心（Center of Pressure, CoP）轨迹较健侧明显向外偏倚；单足支撑下，各方向姿势控制稳定性均明显弱于正常人，在女性及全身韧带松弛症的患者中表现尤为明显。

2.3 脑卒中 脑卒中患者常因肢体肌力下降、感觉异常、肌张力障碍、共同运动等原因导致肢体运动功能障碍，具体可表现为步态异常、平衡能力下降等，这些问题可严重影响脑卒中患者的日常生活及社会参与能力，且会增加二次损害的风险。足底压力分析目前已被广泛应用于脑卒中患者的康复评定、疗效评价、功能预测等多个方面。足底压力分析最初被用来描述脑卒中患者异常的运动学及动力学状态，后来足底压力分析作为一种评定方法来衡量脑卒中患者康复的程度，部分研究也证实了足底压力分析在反映脑卒中患者功能状态和变化方面有着较高的敏感性，且部分步态及足底压力参数与患者功能之间有着较高的相关性。近年来，随着 WFPMS 的广泛应用，其在脑卒中患者康复过程的应用成为热点。日本学者 Naito Y 等人^[16]使用自研鞋垫式足底压力监测系统对 20 例脑卒中患者和 36 例正常人足底压力进行量化采集，对 1 例慢性偏瘫患者在平坦地面、崎岖地形、上楼梯和下坡时的步态及足底压力进行分析，发现慢性偏瘫患者在室内和室外步态中高度依赖健侧。Hillier S 等人^[17]采集 15 例

脑卒中患者在 4 种不同姿势下足底压力、足底接触面积、压力中心轨迹等参数的变化，验证了 F-scan 可穿戴式足底压力监测系统应用于脑卒中患者康复的可行性。Edgar S 等人^[18]基于智能手机和嵌入式传感器自研了一套可穿戴式足底压力监测系统，该系统旨在对脑卒中患者日常活动进行监测，实现了对脑卒中患者姿势和活动模式识别，并通过智能手机为脑卒中患者提供行为数据反馈。Choi H S 等人^[19]使用可穿戴式足底压力监测设备对脑卒中患者康复训练前后的足部压力中心前后位移（Anterior-posterior Displacement of the Center of Pressure, apCoP）变化进行测量，发现 apCoP 的变化和患侧肢体平衡能力、前向控制能力的变化相关，认为 apCoP 可以反映脑卒中患者患侧下肢功能的变化。Echigoya K 等人^[20]使用可穿戴式足底压力监测设备对脑卒中后患者进行步行试验，旨在探究影响脑卒中患者恢复自主行走能力的因素，结果发现第一足趾、外侧足趾压力和 CoP 前后径长度的改善是恢复独立行走能力的客观标志。

2.4 可穿戴式足底压力测量设备在其他领域的应用 WFPMS 不仅在医疗领域应用广泛，在人体生物力学研究、日常生活活动监测、鞋类装备制造、跌倒预防等方面也有着广泛的应用。

日本学者 Yamamoto T 等人^[21]使用自行研发的鞋垫式足底压力采集系统对 100 例不同性别受试者日常活动中的足底压力分布情况进行检测，发现与男性相比，女性在站立和行走时足趾、前足和足内侧的峰值压力显著高于男性。Jasiewicz B 等人^[22]使用脚踏压力 ITE 系统（一种鞋垫式足底压力测量系统）对 20 例青年受试者步行下的足底压力进行了定量监测，并提出了一种新的算法用以描述步行状态下足底压力分布，该算法以足跟部传感器所承受的最大载荷为基础，与足底部其他传感器所受到的最大负载相比较，计算不同位置占足跟部负载的百分比。该数据分析法操作简单，易于应用，并且排除了不同体重、步行速度等混杂因素对足底压力的影响。Huang Y P 等人^[23]使用无线足底压力监测系统（Tekscan 公司，美国）对使用足弓支撑鞋垫的扁平足患

者在步行过程中的站立时间、足底压力和接触面积进行检测,证实了佩戴弓形支撑鞋垫可以缩短扁平足患者站立相时间,分散步行过程中足部分压力,降低不良事件发生的风险。Bousie J A 等人^[24]应用 Pedar[®]-X 系统(Novel 公司,德国)评估足部矫形器不同的硬度及放置位置对骑手骑行过程中感知舒适度和支撑力的影响。

伴随着人工智能发展的浪潮,基于大量数据进行的深度学习也被应用于足压监测领域。Matijevich E S 等人^[25]将可穿戴式足底压力监测设备和小腿部惯性传感器数据相结合,配合自行开发的基于物理和机器学习的算法来估算胫骨峰值力,用以预防相关的骨骼损伤。这项研究揭示了可穿戴设备、肌肉骨骼生物力学和机器结合的巨大潜力,为监测肌肉骨骼运动学及动力学参数提供了新思路。Rupérez M J 等人利用鞋内的压力传感器配合人工神经网络技术来预测步行状态下鞋对于足背部的压力,该研究并未局限于足底与接触面之间的相互作用力,通过与不同的技术手段相结合,极大地扩充了可穿戴式足底压力监测系统的用途。

3 可穿戴足底压力监测系统发展现状

尽管 WFPMS 已经被广泛应用于诸多领域,但仍有研究者在不断地扩充其功能及应用范围。这些工作大体上可被分为两类,一类是在现有系统的基础上增加多类型传感器来获得更多种类的数据。通过同时采集足底压力数据之外的多个不同类型参数,如肌电、心电、步态参数,甚至脑电等,来反映和评估受试者静态或动态运动中的人体变化。另一类是通过人工智能对现有系统及临床采集的数据进行深度学习、数据挖掘、建模,实现功能预测及分类,这些技术有助于对步态表征进行量化分析^[26]。在临床应用,如果这些方法能够预测疾病的恢复状态和时间,将会是一个巨大飞跃。

然而,对于 WFPMS 的发展而言,这两种尝试是可以并存的。更多类型的数据有助于进一步推动人工智能在可穿戴足底压力监测方面的应用。因此,WFPMS 势必会朝着智能化及多功能化发展。

4 可穿戴式足底压力监测系统应用的局限性

从系统硬件角度看,现阶段 WFPMS 仍存在信号延迟、材料耐用性差、压力分辨率低、电池续航能力不足等诸多问题^[2]。随着传感器技术的进步,这些问题会逐步得到解决。目前有学者尝试将摩擦纳米发电技术引入到可穿戴式系统的研发中,这一技术将可能会解决当前传感器电池续航不足的困扰^[27]。现阶段 WFPMS 仍需在提升传感器性能及耐用性、提高无线数据传输范围和压力分辨率方面进行研究^[4]。

从实际应用角度看,目前仅能实现在有限时间内对静态或平地步行、上下楼梯等简单活动状态下的足底压力采集,还无法实现对受试人群长时间日常生活数据的跟踪监测。抛开设备性能问题,对于受试人群尤其是患者人群的基于可穿戴式系统长时程足底部生物力学及运动学的研究仍不多。而且,由于主流设备类型和规格不一致、相关研究实验设置尚无统一标准、测量方法的异质性等大等原因,导致无法开展荟萃分析,所以在进一步的研究中需注意实验方法的标准化^[10]。

5 总结与展望

可穿戴足底压力监测系统因便携、低成本、使用场景灵活等特点,被广泛应用于日常生活监测、运动设备研发、疾病预防及诊治等多个领域。尽管其在数据分辨率、耐用性、实验设置等方面仍有局限,但随着传感器技术的进步及实验设置的逐步完善,这些问题将会逐步被解决。越来越多的学者将人工智能引入到足底压力分析中,在智能预测、分析、诊断等方面展示出较大潜力。随着可穿戴压力足底压力监测系统和人工智能技术结合的逐步深入,将会极大地助力其在医疗健康领域的发展,具有良好的应用前景。

利益冲突声明: 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明: ①程翔、郭瑞负责论文内容撰写;②程翔负责论文修改;③潘钰、伍晓明负责拟定写作思路,设计论文框架,起草论文,指导文章撰写并最后定稿。

参考文献

- [1] LIN S, TAO H, WANG Y Y, et al. In-shoe plantar pressure measurement and analysis system based on fabric pressure sensing array[C]// Bioinformatics and Bioengineering. IEEE, 2010.
- [2] Zulkifli S S, Loh W P. A state-of-the-art review of foot pressure [J]. *Foot Ankle Surg*, 2020, 26(1): 25–32.
- [3] Abdul R A H, Zayegh A, Begg R K, et al. Foot plantar pressure measurement system: a review [J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 9884–9912.
- [4] 陈足娇, 张睿, 卓雯雯, 等. 可穿戴足底压力监测系统研究进展 [J]. *纺织学报*, 2021. DOI:10.13475/j.fzxb.20200806008.
- [5] Song K, Chambers A R. *Diabetic Foot Care* [M]. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC, 2022.
- [6] 孙子林, 陆军, 徐治, 等. 糖尿病足基层筛查与防治专家共识 [J]. *中国糖尿病杂志*, 2019, 27(06): 401–407.
- [7] Chatwin K E, Abbott C A, Boulton A J M, et al. The role of foot pressure measurement in the prediction and prevention of diabetic foot ulceration—a comprehensive review [J]. *Diabetes Metab Res Rev*, 2020. DOI:10.1002/dmrr.3258.
- [8] WANG D, OUYANG J, ZHOU P, et al. A novel low-cost wireless footwear system for monitoring diabetic foot patients [J]. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2021, 15(1): 43–54.
- [9] 许鸿本, 赵国睿, 赵文, 等. 糖尿病足预警系统研究进展 [J]. *中国糖尿病杂志*, 2022, 30(3): 231–233.
- [10] Jones P, Davies M J, Khunti K, et al. In-shoe pressure thresholds for people with diabetes and neuropathy at risk of ulceration: a systematic review [J]. *J Diabetes Complications*, 2021, 35(3): 107815.
- [11] 黄玲晓. 糖尿病人足底压力分布研究及其临床应用 [D]. 天津科技大学, 2017.
- [12] Yavuz M, Ersen A, Monga A, et al. Temperature-and pressure-regulating insoles for prevention of diabetic foot ulcers [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2020, 59(4): 685–688.
- [13] Nouman M, Dissaneewate T, Leelasamran W, et al. The insole materials influence the plantar pressure distributions in diabetic foot with neuropathy during different walking activities [J]. *Gait & Posture*, 2019, 74(5): 154–161.
- [14] Nyska M, Shabat S, Simkin A, et al. Dynamic force distribution during level walking under the feet of patients with chronic ankle instability [J]. *British journal of sports medicine*, 2003, 37(6): 495–497.
- [15] 侯宗辰, 敖英芳, 胡跃林, 等. 慢性踝关节不稳患者足底压力特征及相关因素分析 [J]. *北京大学学报(医学版)*, 2021, 53(2): 279–285.
- [16] Naito Y, Kimura Y, Hashimoto T, et al. Quantification of gait using insole type foot pressure monitor : clinical application for chronic hemiplegia[J]. *J Uoeh*, 2014, 36(1): 41–48.
- [17] Hillier S, Lai M S. Insole plantar pressure measurement during quiet stance post stroke [J]. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 2016, 16(3): 189–195.
- [18] Edgar S, Swyka T, Fulk G, et al. Wearable shoe-based device for rehabilitation of stroke patients [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5627577.
- [19] Choi H S, Choi H, Kang S, et al. Change in center of pressure progression in the foot provides clues for functional improvement of the more affected lower limb during post-stroke gait rehabilitation [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2021, 100(3): 229–234.
- [20] Echigoya K, Okada K, Wakasa M, et al. Changes to foot pressure pattern in post-stroke individuals who have started to walk independently during the convalescent phase [J]. *Gait Posture*, 2021. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2021.09.181.
- [21] Yamamoto T, Hoshino Y, Kanzaki N, et al. Plantar pressure sensors indicate women to have a significantly higher peak pressure on the hallux, toes, forefoot, and medial of the foot compared to men [J]. *J Foot Ankle Res*, 2020, 13(1): 40.
- [22] Jasiewicz B, Klimiec E, Motek M, et al. Quantitative analysis of foot plantar pressure during walking [J]. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 2019. DOI: 10.12659/MSM.914915.
- [23] HUANG Y P, PENG H T, WANG X, et al. The arch support insoles show benefits to people with flatfoot on stance time, cadence, plantar pressure and contact area [J]. *PLoS One*, 2020, 15(8): e0237382.
- [24] Bousie J A, Blanch P, Mcpoil T G, et al. Hardness and posting of foot orthoses modify plantar contact area, plantar pressure, and perceived comfort when cycling [J]. *J Sci Med Sport*, 2018, 21(7): 691–696.
- [25] Matijevich E S, Scott L R, Volgyesi P, et al. Combining wearable sensor signals, machine learning and biomechanics to estimate tibial bone force and damage during running[J]. *Hum Mov Sci*, 2020. DOI: 10.1016/j.humov.2020.102690.
- [26] Mohan D M, Khandoker A H, Wasti S A, et al. Assessment methods of post-stroke gait: a scoping review of technology-driven approaches to gait characterization and analysis [J]. *Front Neurol*, 2021. DOI: 10.3389/fneur.2021.650024.
- [27] 韩昌报, 王嫚琪, 黄建华, 等. 摩擦纳米发电技术研究进展及其潜在应用 [J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(10): 1103–1127.

编辑：刘静凯