

一款基于可穿戴传感器的便携式步态检测系统的信效度研究

万春利¹, 郭川¹, 王雪¹, 王媛², 王健², 钱盈舟², 孙振宇², 邹俊³, 黄思思^{1*}

1 南京医科大学第一附属医院, 江苏 南京 210029;

2 江苏钟山老年康复医院, 江苏 南京 210049;

3 苏州大学附属第一医院, 江苏 苏州 215006

* 通信作者: 黄思思, E-mail: hss0904@163.com

收稿日期: 2024-01-15; 接受日期: 2024-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2009700); 江苏省重点研发计划重点项目(BE2023023-2);

江苏省医学创新中心资助项目(CXZX202222)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.04011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 **目的** 验证一款基于可穿戴传感器的便携式 Right Gait & Posture[®]步态检测系统的信度和效度。**方法** 江苏钟山老年康复医院于 2023 年 8—11 月招募 36 例健康受试者, 由 2 名受过培训的评估者采用 Right Gait & Posture[®]步态检测系统对每位受试者进行 3 次步态检测, 评估者 1 完成第 1 次和第 2 次测试, 评估者 2 完成第 3 次测试, 所有测试均在同一天内完成。记录步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步幅、足偏角、着地角度、着地内翻角度和蹬离角度等步态参数。采用组内相关系数(ICC)计算测试者间信度和重复测试的相对信度; 采用测量标准误(SEM)和最小真正改变量(MDC)作为重复测试的绝对信度。以视频步态分析法作为对照, 采用 Bland-Altman 法计算 95% 一致性界限, 分析 Right Gait & Posture[®]系统检测步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速 4 项步态参数的效度。**结果** ① 测试者间信度: 2 名评估者间步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步幅、着地角度、着地内翻角度、蹬离角度和足偏角的 ICC 值为 0.901~0.981。② 重复测试信度: 同一个评估者 2 次测试间的步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步幅、着地角度、着地内翻角度、蹬离角度和足偏角 ICC 值为 0.822~0.983。各项步态参数 SEM 和 SEM% 值分别为 0.02~2.17 和 0.49%~13.83%, MDC 和 MDC% 值分别为 0.06~6.02 和 1.37%~38.34%。③ 效度分析: Bland-Altman 图显示步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速的绝对误差平均值和 95% CI 分别为 0.003 s, (-0.059, 0.064); 0.756%, (-3.048, 4.560); -0.756%, (-4.560, 3.048); -0.001 m/s, (-0.155, 0.152)。**结论** Right Gait & Posture[®]系统在时空参数和踝关节运动学参数方面具有较好信度; 在步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速方面具有较高效度, 值得临床推广应用。

关键词 步态分析; 可穿戴传感器; 惯性传感器; 鞋垫压力传感器; 视频步态分析; 信度; 效度

步态分析是研究步行规律的检查方法, 旨在揭示步态异常的关键环节及影响因素, 从而指导康复治疗, 并对干预效果进行评价^[1]。目前步态分析主要包括定性分析、半定量分析和定量分析 3 种方式。其中定性分析和半定量分析均主要以评定者的视

觉观察为基础, 描述步行周期中各时相出现的步态异常, 具有较强的主观性^[2]。定量分析主要检测步行中时空参数和运动学参数, 前者涉及步频、步速、步长、跨步长、步宽和足偏角等; 后者涉及人体各关节运动中的位置、角度、速度和加速度等。对这些

引用格式: 万春利, 郭川, 王雪, 等. 一款基于可穿戴传感器的便携式步态检测系统的信效度研究[J]. 康复学报, 2024, 34(4): 383-389.

WAN C L, GUO C, WANG X, et al. Reliability and validity study of a portable gait detection system based on wearable sensors [J]. Rehabil Med, 2024, 34(4): 383-389.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.04011

©《康复学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 4.0 协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

信息进行处理和分析,对于发现和诊断病理步态具有重要价值。目前常用三维步态分析实现对步态的定量检测,但该系统价格昂贵、操作复杂、不便携、对场地设施要求较高,难以广泛应用于临床^[3]。

近年来,可穿戴传感器技术已经逐渐应用到临床步态检测中^[4]。现有一种基于鞋垫压力传感器结合惯性传感器的便携式实时步态分析系统可以用于步态定量分析,该系统操作简单,可进行步态时空参数和运动学参数分析。相对于三维步态分析,其测试环境不限于实验室,成本较低,更利于临床推广使用。本研究旨在介绍一种简易的定量步态检测系统,并对其信效度进行分析,为临床使用该系统提供证据支持。

1 临床资料

1.1 样本选择标准

1.1.1 纳入标准 ① 无步态功能异常的健康受试者;② 年龄18~60岁;③ 性别不限;④ 无腰痛、双下肢乏力、关节结构异常;⑤ 无双下肢手术及外伤病史;⑥ 无精神障碍、认知功能异常,能够理解并配合试验要求;⑦ 受试者对本研究知情同意,并自愿签署知情同意书。

1.1.2 排除标准 ① 近期发生运动损伤,影响正常步行;② 患有房颤、心律失常等心脏疾病;③ 测试过程中出现下肢不适、疼痛;④ 测试当天因各种原因未能进行完整的3次步态测试者。

1.2 一般资料

采用PASS 2021软件对样本量进行估算,选择评估者间组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)的差异性检验, $\alpha=0.05$, 检验功效 $(1-\beta)=0.90$, 每个对象观测次数=2, H_0 假设下组内相关系数 $ICC_0=0.75$, H_1 假设下组内相关系数 $ICC_1=0.9$, 计算得出至少需要36例受试者。江苏钟山老年康复医院于2023年8—11月通过海报招募36例健康受试者,其中男17例,女19例;年龄 (23.81 ± 6.96) 岁;身高 (1.71 ± 0.08) m;体质量 (68.3 ± 12.62) kg。本研究方案经南京医科大学第一附属医院伦理委员会审核批准(审批号:2023-SR-049)。

2 方法

2.1 数据采集

要求受试者在测试前1 d充分休息,避免剧烈运动;测试当天穿运动鞋和宽松衣裤。

2.1.1 信度研究数据采集 由2名经过专业培训的

评估者(评估者1、2)使用Right Gait & Posture[®]三维步态分析系统(深圳行正科技有限公司)对受试者进行步态测试。步态测试共进行3次,在同一天内完成,相邻测试间隔至少20 min。评估者1完成第1次和第2次测试,评估者2完成第3次测试。

2.1.1.1 测试前准备 准备1套Right Gait & Posture[®]系统和1台平板电脑。平板电脑安装Right Gait & Posture[®]数据分析软件,Right Gait & Posture[®]系统包含6对不同尺码的鞋垫压力传感器、1对惯性传感器。见图1。选择1条长30 m的平整路面作为测试步道,设置起点和终点并进行标记。测试前,帮助受试者选择合适尺码的传感鞋垫,将惯性传感器分别安装在2只传感鞋垫下方凹槽内,再将鞋垫放置于受试者的鞋中(为了提高穿着舒适性,需将原有鞋垫取出)。



图1 Right Gait & Posture[®]系统组成部件

Figure 1 Components of Right Gait & Posture[®] System

2.1.1.2 运动学参数采集 测试时,受试者需要穿戴鞋垫完成50 s连续步行测试,通过蓝牙设备将数据自动上传Right Gait & Posture[®]系统。Right Gait & Posture[®]系统的传感鞋垫内包含了数百个压力传感器,能够分析静态和动态下足底压力分布情况。惯性传感器内含有加速度计、陀螺仪等惯性测量模块和高性能嵌入式微处理器,可实时记录步行时的时空参数及踝关节的运动学特征。本研究仅关注步态时空参数和踝关节运动学参数的信效度。

2.1.2 效度研究数据采集 采用视频步态分析法^[5]对Right Gait & Posture[®]系统的部分时空参数(步态周期、支撑相占比、摆动相占比和步速)进行验证。

2.1.2.1 数据采集 测试时采用和Right Gait & Posture[®]步态测试相同的步道,分别在距离起点2、10 m处放置锥形桶标记物。受试者进行第2次步态测试时,由评估者1手持智能手机(HUAWEI Mate30)在受试者的右侧斜后方同步进行视频跟拍(手机拍摄视频分辨率为1 920×1 080,30帧/s)。

2.1.2.2 数据分析 采用VirtualDube 2[®]视频分析

软件对照步行视频进行步态周期、支撑相占比、摆动相占比和步速等时空参数分析。

2.2 观察指标

2.2.1 步态时空参数 ①步态周期:一侧足跟触地到该侧足跟再次触地间隔的时间。②摆动相占比:单个步态周期中,一侧足趾离地至该侧足跟触地时间与步态周期的比值为摆动相占比。③支撑相占比:单个步态周期中,一侧足跟触地至该侧足趾离地时间与步态周期的比值为支撑相占比。④步速:单位时间内的平均步行速度。⑤步频:单位时间内步行的平均步数。⑥步幅:指一足着地至同一足再次着地的距离。⑦足偏角:足中心线与同侧步行直线之间的夹角。

2.2.2 踝关节运动学参数 ①着地角度:首次触地时踝背屈的角度。②着地内翻角度:首次触地时踝内翻的角度。③蹬离角度:摆动前期踝跖屈的角度。

2.3 信度与效度分析

2.3.1 信度分析 信度分析包括测试者间信度和重复测试信度分析。测试者间信度比较评估者1和评估者2的步态测试结果(即第2次和第3次测试)的信度。重复测试信度(测试者内部信度)比较评估者1的2次测试结果(即第1次和第2次测试)。为了验证重复测试结果的稳定性,同时量化重复测量的误差量^[6],本研究在重复测试信度方面增加了绝对信度分析。当同一个受试者前后2次测试值的变化量<测量标准误(standard error of measurement, SEM)和最小真正改变量(minimal detectable change, MDC)时,才可认为2次测量结果差异是由于测量误差引起的,并非临床意义上的变化。

SEM% < 15% 或 MDC% < 30% 为可接受的误差范围^[7]。相应的计算公式如下:

$$\text{SEM}\% = (\text{SD} \times \sqrt{1 - \text{ICC}} / \text{mean}) \times 100\%$$

$$\text{MDC}\% = (1.96 \times \sqrt{2} \times \text{SD} \times \sqrt{1 - \text{ICC}} / \text{mean}) \times 100\%$$

其中,SD为2次测试平均值的标准差,mean为2次测试的平均值。

2.3.2 效度分析 比较Right Gait & Posture®系统与视频步态分析法在部分时空参数(步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速)结果上的一致性,验证Right Gait & Posture®系统在以上4个步态时空参数检测上的准确性。

2.4 统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件进行数据分析。计量资料符合正态分布以($\bar{x} \pm s$)表示,组间比较采用两独立样本 t 检验。采用ICC作为信度检验指标,包括测试者间信度和重复测试的相对信度。信度的界定范围如下:ICC > 0.90为极好;ICC > 0.7为好;ICC < 0.7为信度欠佳^[8]。重复测试的绝对信度采用SEM和MDC检测。效度分析采用GraphPad Prism 9软件Bland-Altman法计算95%一致性界限并生成Bland-Altman图^[9]。通常认为超出一致性界限病例数占比 < 10%,即可认为2种测量方法存在高度一致性^[10]。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

3 结果

3.1 信度分析

3.1.1 测试者间信度 2名评估者间步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步幅、着地角度、着地内翻角度、蹬离角度和足偏角的ICC值为0.901~0.981。见表1。

表1 测试者间信度($\bar{x} \pm s$)
Table 1 Reliability of inter-tester ($\bar{x} \pm s$)

步态时空参数	评估者1	评估者2	ICC值	95% CI	P值
步态周期/s	1.05±0.07	1.04±0.07	0.950	(0.904,0.974)	<0.001
摆动相占比/%	36.01±1.88	36.06±1.77	0.901	(0.814,0.948)	<0.001
支撑相占比/%	63.99±1.77	63.94±1.77	0.901	(0.814,0.948)	<0.001
步速/(m/s)	1.33±0.18	1.36±0.18	0.950	(0.905,0.974)	<0.001
步频/(步/min)	114.56±7.62	115.45±7.37	0.953	(0.909,0.976)	<0.001
步幅/m	1.39±0.13	1.41±0.13	0.946	(0.897,0.972)	<0.001
足偏角/°	7.96±8.86	8.00±8.79	0.981	(0.964,0.991)	<0.001
着地角度/°	16.47±5.06	16.71±5.01	0.954	(0.912,0.976)	<0.001
着地内翻角度/°	13.25±4.48	13.43±4.26	0.930	(0.867,0.964)	<0.001
蹬离角度/°	62.77±6.49	62.74±6.64	0.979	(0.960,0.989)	<0.001

3.1.2 重复测试信度分析

3.1.2.1 相对信度 同一个评估者 2 次测试间的步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步

幅、着地角度、着地内翻角度、蹬离角度和足偏角 ICC 值为 0.822~0.983。见表 2。

表 2 重复测试相对信度 ($\bar{x}\pm s$)

Table 2 Relative reliability of repeated tests ($\bar{x}\pm s$)

步态时空参数	第 1 次测试	第 2 次测试	ICC 值	95% CI	P 值
步态周期/s	1.05±0.07	1.05±0.07	0.905	(0.822,0.950)	<0.001
摆动相占比/%	36.00±1.69	36.01±1.88	0.897	(0.807,0.946)	<0.001
支撑相占比/%	64.00±1.99	63.99±1.88	0.967	(0.936,0.983)	<0.001
步速/(m/s)	1.33±0.17	1.33±0.18	0.840	(0.709,0.915)	<0.001
步频/(步/min)	114.76±7.59	114.56±7.62	0.935	(0.877,0.967)	<0.001
步幅/m	1.39±0.13	1.39±0.13	0.822	(0.678,0.905)	<0.001
足偏角/°	8.17±8.30	7.96±8.86	0.983	(0.967,0.991)	<0.001
着地角度/°	15.93±5.29	16.47±5.06	0.942	(0.890,0.970)	<0.001
着地内翻角度/°	13.23±4.33	13.25±4.48	0.932	(0.871,0.965)	<0.001
蹬离角度/°	62.56±5.65	62.77±6.49	0.864	(0.749,0.928)	<0.001

3.1.2.2 绝对信度 各项步态参数 SEM 和 SEM% 值分别为 0.06~6.02 和 1.37%~38.34%。见表 3。分别为 0.02~2.17 和 0.49%~13.83%, MDC 和 MDC%

表 3 重复测试绝对信度

Table 3 Absolute reliability of repeated tests

步态时空参数	SEM	SEM%	MDC	MDC%	$\bar{d}$ 值	P 值
步态周期/s	0.02	2.05	0.06	5.70	0.01	0.66
摆动相占比/%	0.56	1.55	1.55	4.30	0.14	0.91
支撑相占比/%	0.32	0.49	0.88	1.37	0.08	0.32
步速/(m/s)	0.07	5.11	0.19	14.17	0.02	0.83
步频/(步/min)	1.91	1.66	5.29	4.61	0.46	0.66
步幅/m	0.05	3.95	0.15	10.94	0.01	0.66
足偏角/°	1.11	13.83	3.09	38.34	0.27	0.44
着地角度/°	1.23	7.58	3.40	21.02	0.29	0.07
着地内翻角度/°	1.13	8.53	3.13	23.64	0.27	0.95
蹬离角度/°	2.17	3.47	6.02	9.60	0.53	0.70

注: $\bar{d}$ 值为 2 次测试结果绝对误差的平均值。

Note: $\bar{d}$ value is the mean value of absolute error of the two test results.

3.2 效度分析

采用 Bland-Altman 法分析 Right Gait & Posture® 系统步态测试与视频法步态测试部分步态时空参数的一致性。纵坐标代表 2 种测量方法的差值, 横坐标代表 2 种测量方法的平均值, 中间的红线代表 2 种测量方法差值的平均值, 黑色圆圈越靠近“Mean”线, 代表 2 组数据的一致性越好。本研究 Bland-Altman 图分析结果显示, 4 项步态参数(步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速)绝对误差平均值和 95% CI。见表 4。步态参数 Bland-Altman 图中, 分

别有 34、35、35 和 33 个数据点落在一致性界限以内, 占总体百分比分别为 94.44%、97.22%、97.22% 和 91.67%。见图 2。

表 4 步态参数效度分析

Table 4 Validity analysis of gait parameters

项 目	绝对误差平均值	95% CI
步态周期/s	0.003	(-0.059,0.064)
摆动相占比/%	0.756	(-3.048,4.560)
支撑相占比/%	-0.756	(-4.560,3.048)
步速/(m/s)	-0.001	(-0.155,0.152)

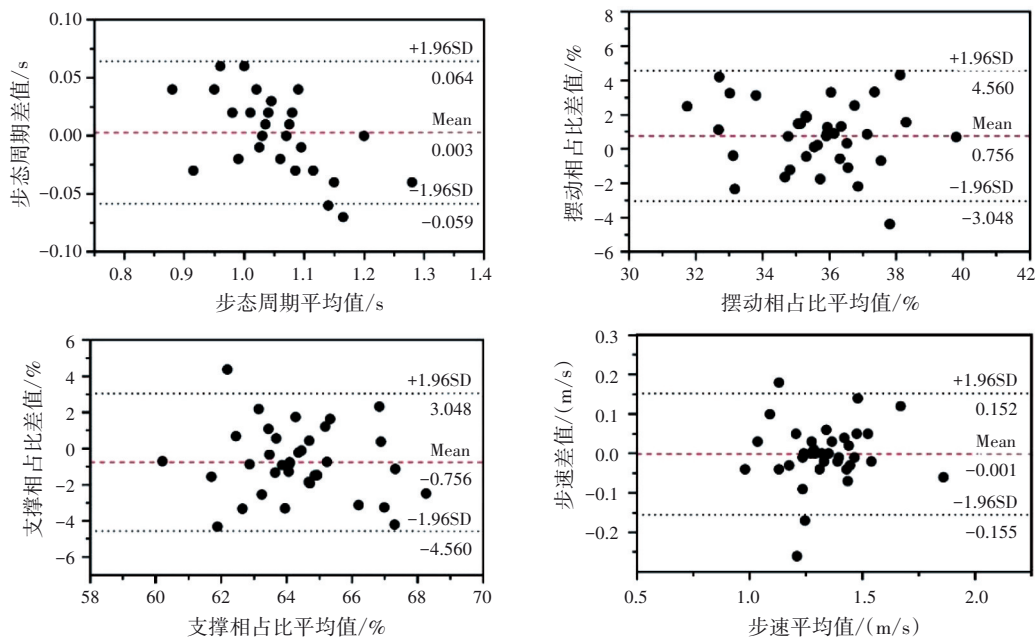


图2 步态参数Bland-Altman分析图

Figure 2 Bland-Altman diagram of gait parameters

4 讨论

4.1 Right Gait & Posture®步态分析系统在步态参数分析方面具有较好的信度

本研究结果显示,2名评估者间和同一个评估者2次测试间步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步幅、着地角度、着地内翻角度、蹬离角度和足偏角的ICC值分别为0.901~0.981、0.822~0.983,提示Right Gait & Posture®系统在步态时空参数(步态周期、摆动相占比、支撑相占比、步速、步频、步幅和足偏角)和踝关节运动学参数(着地角度、着地内翻角度、蹬离角度)方面具有较好的信度。这与以往使用类似可穿戴传感器进行步态分析的研究结果一致^[11-12]。时空参数和运动学参数是步态分析的重要组成部分,通过步态分析,有利于发现不同疾病患者的步态功能异常。Right Gait & Posture®系统具有测试一般步态时空参数和踝关节运动学参数的能力,适合用于各种疾病导致的异常步态分析,尤其针对伴有踝关节运动障碍患者。脑卒中患者常出现各种异常步态,导致步速、步幅、患腿支撑相时间下降,其中踝关节功能障碍更容易导致各种异常步态^[13]。如踝关节背伸能力下降引起的足下垂,会影响脑卒中患者在摆动相的下肢廓清运动,这是脑卒中患者出现“划圈步态”的重要原因之一。足下垂还会干扰支撑相的首次触地和承重反应时相,影响身体重心的顺利前移,这是“膝过伸”步态的常见原因之一。因此,对踝关节的运动学分析有利于

了解踝功能障碍程度,量化评估治疗效果。骨关节疾病患者也常出现步态时空参数和运动学参数的异常,如踝关节骨关节炎患者步态时空参数上常表现为步行速度、步频、步幅和患腿支撑相时间下降^[14],运动学参数表现为步行中踝关节在3个平面(尤其是矢状面)的活动范围均减小^[15]。这可能是因为小腿肌肉力量下降、踝周软组织硬度增加以及试图尽可能保持踝关节稳定的结果。此外,力矩减少可能是一种保护性的步态策略,可减少踝关节的负荷和关节剪切力,减轻步行时踝关节的疼痛。

步态分析是老年神经变性病(尤其是阿尔茨海默病和帕金森病)早期筛查和评估的重要手段。阿尔茨海默病患者单任务自然步态下步行速度降低、步行时间延长、步幅缩短、步态变异性增大^[16]。帕金森病患者表现为步行速度下降、步长缩短、步频增加、双支撑相时间增加、步行变异性增大^[17]。针对此类患者步态异常的早期发现和客观量化分析具有重要的临床意义。因此,可尝试采用Right Gait & Posture®系统对神经系统损伤、骨性关节炎或老年性疾病患者进行量化步态分析,依据具体时空参数和运动学参数分析功能障碍情况,辅助异常步态的诊断,指导临床治疗手段的选择,并评估相应的治疗效果。

4.2 Right Gait & Posture®系统在步态参数分析方面具有较高效度

本研究结果显示,Right Gait & Posture®系统步

态测试与视频法步态测试法在步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速方面具有较高一致性,提示 Right Gait & Posture®系统在步态参数分析方面具有较高效率。这与以往研究结果一致^[18]。研究表明,受试者在不同环境条件下,所采取的步行策略会有所不同,其步态参数变化也各不相同^[19]。因此,在检验 2 种步态分析工具的一致性时,最好使用同一测试环境。三维步态分析系统的步道通常为 6 m 左右,且在实验室环境中进行;而 Right Gait & Posture®步态系统仅对测试时间有要求(50 s),对步道长度并无限制,其测试环境更接近于自然环境。考虑到 2 套不同系统在测试环境上的差异可能会造成测试结果的较大差异,本研究采用了视频步态分析法作为对照,以保证 2 种步态分析方法在相同环境中进行。有研究使用智能手机对脑卒中恢复期患者和健康人步行时的运动学和时空参数进行分析,结果显示视频分析法在步态运动学分析方面具有较好的信度和效度^[20]。智能手机视频分析可以在部分步态时空参数测量上成为三维步态分析的替代品^[21]。

目前定量化的步态分析系统主要包括 3D 视频捕捉或基于传感器设备。尽管 3D 视频捕捉技术提供了高精度测量步态参数的可能,但因其较大成本、过高的空间要求及测试的复杂性,均限制了其在临床常规步态参数定量检测中的应用。传感器的低成本步态检测系统具有便携性、小型化和低成本的特点,可以有效弥补 3D 视频捕捉技术的不足,在临床步态分析检测应用中具有较好的潜力^[22]。惯性传感器是一种结合加速度计和陀螺仪的传感器,可用于测量所附着物体的线性加速度和角速度。鞋垫压力传感器因其成本较低、方便穿戴、不受环境约束、方便实现自然步态测量等优点,常被认作是传统测力台的替代方案。本研究 Right Gait & Posture®步态系统将惯性传感器通过嵌入鞋垫背面凹槽,放置于足弓部位,在受试者连续进行 50 s 步行后,可即时提供步态分析结果,其步态参数检测结果具有较好的信度、效度。这与以往的研究结果一致^[23]。

5 小 结

Right Gait & Posture®系统在无步态异常的健康受试者时空参数和踝关节运动学分析方面展现出较好的信度,在步态周期、摆动相占比、支撑相占比和步速方面具有较高的效度,值得临床推广应用。但本研究也存在一定的局限性,如仅观察无步态异常健康受试者的步态参数;未将 Right Gait & Posture®系统步态检测结果与 Vicon 三维步态检测进行

比较;该系统惯性传感器置于足底,仅能获取步行中踝关节的运动学分析结果,无法获取下肢其他关节的运动情况。下一步研究可开展将 Right Gait & Posture®系统应用于神经系统、骨关节和老年疾病患者的步态分析;开展与 Vicon 三维步态检测结果的比较;优化传感器放置位置或采取多机位的视频分析方法弥补 Right Gait & Posture®系统的不足。

参考文献

- [1] CELIK Y, STUART S, WOO W L, et al. Gait analysis in neurological populations: progression in the use of wearables [J]. *Med Eng Phys*, 2021, 87: 9–29.
- [2] 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, 12: 650024.
- [3] MCGUIRK T E, PERRY E S, SIHANATH W B, et al. Feasibility of markerless motion capture for three-dimensional gait assessment in community settings [J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 867485.
- [4] PRASANTH H, CABAN M, KELLER U, et al. Wearable sensor-based real-time gait detection: a systematic review [J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2727.
- [5] BRAMAH C, PREECE S J, GILL N, et al. Is there a pathological gait associated with common soft tissue running injuries? [J]. *Am J Sports Med*, 2018, 46(12): 3023–3031.
- [6] AHMED I, ISHTIAQ S. Reliability and validity: importance in medical research [J]. *J Pak Med Assoc*, 2021, 71(10): 2401–2406.
- [7] ABDOLLAH V, PARENT E C, BATTIÉ M C. Reliability and validity of lumbar disc height quantification methods using magnetic resonance images [J]. *Biomed Tech (Berl)*, 2019, 64(1): 111–117.
- [8] MATAMALA J M, HOWELLS J, DHARMADASA T, et al. Inter-session reliability of short-interval intracortical inhibition measured by threshold tracking TMS [J]. *Neurosci Lett*, 2018, 674: 18–23.
- [9] HARKEY M S, MICHEL N, KUENZE C, et al. Validating a semi-automated technique for segmenting femoral articular cartilage on ultrasound images [J]. *Cartilage*, 2022, 13(2): 19476035221093069.
- [10] MARTINEZ-MARTIN P, RADICATI F G, RODRIGUEZ BLAZQUEZ C, et al. Extensive validation study of the Parkinson's disease composite scale [J]. *Eur J Neurol*, 2019, 26(10): 1281–1288.
- [11] SCHWARZ A, AL-HAJ HUSAIN A, EINAUDI L, et al. Reliability and validity of a wearable sensing system and online gait analysis report in persons after stroke [J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 624.
- [12] 冀锐. 穿戴式足底压力分布测量系统及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 10–12.
- [13] JI R. Wearable plantar pressure mapping system and its application research [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 10–12.
- [13] JAQUELINE DA CUNHA M, RECH K D, SALAZAR A P, et al. Functional electrical stimulation of the peroneal nerve improves post-stroke gait speed when combined with physiotherapy. A sys-

- tematic review and meta-analysis [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2021, 64(1):101388.
- [14] KOSIK K B, TERADA M, MCCANN R, et al. Differences in temporal gait mechanics are associated with decreased perceived ankle joint health in individuals with chronic ankle instability [J]. *Gait Posture*, 2019, 70:403–407.
- [15] EERDEKENS M, DESCHAMPS K, WUITE S, et al. Loss of mechanical ankle function is not compensated by the distal foot joints in patients with ankle osteoarthritis [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2021, 479(1):105–115.
- [16] BEAUCHET O, ALLALI G, MONTERO-ODASSO M, et al. Motor phenotype of decline in cognitive performance among community-dwellers without dementia: population-based study and meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6):e99318.
- [17] MIRELMAN A, BONATO P, CAMICIORI R, et al. Gait impairments in Parkinson's disease [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(7):697–708.
- [18] 张文通, 钮金圆, 许光旭, 等. 一种便携式步态分析仪评估脑卒中步态时空参数的信度与效度研究[J]. *康复学报*, 2016, 26(5):25–28.
- ZHANG W T, NIU J Y, XU G X, et al. Reliability and validity of the portable analyses of temporal and spatial gait parameters in patients with stroke [J]. *Rehabil Med*, 2016, 26(5):25–28.
- [19] NAGANO K, HORI H, MURAMATSU K. A comparison of at-home walking and 10-meter walking test parameters of individuals with post-stroke hemiparesis [J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(2):357–359.
- [20] 蔡童欣, 雷敏聪, 周逸钧, 等. 脑卒中恢复期患者计时起立步行测试的视频运动学分析[J]. *康复学报*, 2023, 33(5):412–418, 427.
- CAI T X, LEI M C, ZHOU Y J, et al. Video kinematic analysis of timed up and go test in convalescent stroke patients [J]. *Rehabil Med*, 2023, 33(5):412–418, 427.
- [21] AROOJIS A, SAGADE B, CHAND S. Usability and reliability of the Edinburgh visual gait score in children with spastic cerebral palsy using smartphone slow-motion video technology and a motion analysis application: a pilot study [J]. *Indian J Orthop*, 2021, 55(4):931–938.
- [22] JAKOB V, KÜDERLE A, KLUGE F, et al. Validation of a sensor-based gait analysis system with a gold-standard motion capture system in patients with Parkinson's disease [J]. *Sensors*, 2021, 21(22):7680.
- [23] ANWARY A R, YU H N, VASSALLO M. Optimal foot location for placing wearable IMU sensors and automatic feature extraction for gait analysis [J]. *IEEE Sens J*, 2018, 18(6):2555–2567.

Reliability and Validity Study of A Portable Gait Detection System Based on Wearable Sensors

WAN Chunli¹, GUO Chuan¹, WANG Xue¹, WANG Yuan², WANG Jian², QIAN Yingzhou², SUN Zhenyu², ZOU Jun³, HUANG Sisi^{1*}

¹ The First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

² Jiangsu Zhongshan Geriatric Rehabilitation Hospital, Nanjing, Jiangsu 210049, China;

³ The First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

*Correspondence: HUANG Sisi, E-mail: hss0904@163.com

ABSTRACT Objective To verify the reliability and validity of a portable Right Gait & Posture® gait detection system based on wearable sensors. **Methods** A total of 36 healthy volunteers were recruited in the Jiangsu Zhongshan Geriatric Rehabilitation Hospital from August to November 2023. Right Gait & Posture® system was used to detect the gait of each subject for three times by two trained assessors. The assessor 1 completed the first and second tests, and the assessor 2 completed the third test. All tests were completed on the same day. Gait parameters such as gait cycle, swing phase proportion, stance phase proportion, walking speed, stride frequency, stride length, foot deviation angle, ground contact angle, ground contact inward rotation angle and propulsion angle were recorded. The intragroup correlation coefficient (ICC) was used to calculate the inter-tester reliability and the relative reliability of the repeated tests, and the standard error of measurement (SEM) and the minimum detectable change (MDC) were calculated as the absolute reliability of the repeated tests. With video gait analysis as a control, Bland-Altman method was used to calculate the 95% consistency limit, and the validity of the Right Gait & Posture® gait detection system in detecting gait cycle, swing phase ratio, stance phase proportion and walking speed was analyzed. **Results** (1) Inter-tester reliability: the ICC values of gait cycle, swing phase proportion, stance phase proportion, walking speed, stride frequency, stride length, foot deviation angle, ground contact angle, ground contact inward rotation angle, forward propulsion angle and foot deviation angle between two assessors were 0.901 to 0.981. (2) Test-retest reliability: the ICC values of gait cycle, swing phase proportion, stance phase proportion, walking speed, stride frequency, stride length, ground contact angle, ground contact inward rotation angle and forward propulsion angle and foot deviation angle between the two tests of the same assessor were 0.822 to 0.983. The SEM and SEM% values of gait parameters were 0.02 to 2.17 and 0.49% to 13.83%, respectively. The MDC and MDC% values were 0.06 to 6.02 and 1.37% to 38.34%, respectively. (3) Validity analysis: Bland-Altman plot showed that the mean absolute errors and 95% CI of gait cycle, swing phase proportion, stance phase proportion and walking speed were 0.003 s, (−0.059, 0.064); 0.756%, (−3.048, 4.560); −0.756%, (−4.560, 3.048); −0.001 m/s, (−0.155, 0.152), respectively. **Conclusion** Right Gait & Posture® gait detection system shows good reliability in spatio-temporal parameters and ankle kinematics parameters, and has high validity in gait cycle, swing phase proportion, stance phase proportion and walking speed, which is recommended for clinical application.

KEY WORDS gait analysis; wearable sensor; inertial sensor; insole pressure sensor; video gait analysis; reliability; validity

DOI:10.3724/SP.J.1329.2024.04011