

doi:10.19677/j.issn.1004-7964.2024.05.011

# Xsens 惯性传感器系统在步态分析中的重测信度研究

冯雨果<sup>1</sup>, 张丁午<sup>1</sup>, 刘玲玥<sup>1</sup>, 刘宇<sup>2</sup>, 王睿<sup>3\*</sup>

(1. 西华大学美术与设计学院, 四川成都 610039; 2. 重庆布瑞斯科技有限公司, 重庆 401120; 3. 成都市产品质量监督检验研究院, 四川成都 610041)

**摘要:**探究 Xsens 惯性传感器运动捕捉系统测量时空步态参数和下肢关节角度的重测信度。在 2 个测试日分别采集 15 名健康个体步行过程中的时空步态参数(步速、步长、步频、支撑相占比和双支撑相占比)以及髋、膝和踝关节在矢状面、额状面和水平面的最大角度和关节活动度, 2 次测试间隔(6 ± 1) d。采用组内相关系数及测量标准误比较两次测试的相对信度与绝对信度。结果发现, 两次测试的时空步态参数的相对信度结果为一般至极好, 绝大部分时空部分参数的绝对信度表现优秀; 矢状面上所有关节角度具有极好的重测性, 冠状面和水平面上三个关节角度表现为一般至极好, 所有关节角度的绝对信度结果均优秀。综上所述, Xsens 系统对于测量健康年轻人的时空步态参数和下肢关节角度是可靠的, 临床医生和研究人员可以使用 Xsens 系统来进行健康人体的步态研究。

**关键词:**惯性测量装置; 步态分析; 时空步态参数; 下肢关节角度; 可靠性分析

**中图分类号:**TS 943.1 **文献标志码:**A

## Repeatability of Gait Parameters in Healthy Adults based on Xsens Inertial Sensor System

FENG YUGUO<sup>1</sup>, ZHANG DINGWU<sup>1</sup>, LIU LINGYUE<sup>1</sup>, LIU YU<sup>2</sup>, WANG RUI<sup>3\*</sup>

(1. College of Art and design, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Chongqing Brice Technology Co., Ltd, Chongqing 401120, China; 3. Chengdu Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The aim of this study was to investigate the test-retest reliability of spatiotemporal parameters and lower-limb joint angles, obtained from Xsens inertial-sensor-based motion capture system during walking in healthy subjects. Fifteen able-bodied adults completed two separate gait assessments, separated by 6 ± 1 days. Spatiotemporal parameters and lower-limb joint angles were analyzed. The intraclass correlation coefficient (ICC) and standard error of measurement (SEM) were used to compare the relative reliability and absolute reliability of those two sessions. The results showed that the ICC of the spatiotemporal parameters was generally fair-to-excellent, and most of the SEM was excellent. All joints in sagittal plane were excellent and fair-to-excellent agreement was found for all joint angles in transverse and frontal plane, and SEM results were excellent. Our results suggest that the Xsens system is reliable for measuring spatiotemporal gait parameters and lower-limb joint angles in healthy young people, and it can be used by clinicians or researchers to conduct gait research.

**Key words:** inertial measurement units; gait analysis; spatiotemporal gait parameters; lower limb joint angle; reliability

### 前言

人体运动测量用于获取人体方向、关节角度、

环境反作用力等信息, 是生物力学、康复学、人机交互等研究的重要基础<sup>[1]</sup>。目前, 人体运动测量的黄金标准是光学运动捕捉(Optical motion capture, OMC), 但操作的复杂性和高成本限制了使用范围<sup>[2]</sup>。近年来, 惯性传感器(Inertial measurement unit, IMU)作为一种补充方案被广泛引入到人体运动测量中<sup>[3]</sup>, 具有便携性、低成本和易用性等特点, 被广泛运用于医疗机构和家庭等环境中<sup>[4]</sup>。这些传感器单元连接

收稿日期: 2023-12-27 修回日期: 2024-02-20 接受日期: 2024-02-21  
基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK155)  
第一作者简介: 冯雨果(1985-), 男, 博士, 副教授。研究方向: 人机工效学和医疗产品设计。E-mail: fengyuguoxyz@163.com。  
\* 通信作者: 王睿(1982-), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 产品质量检验检测及标准化。E-mail: wangruied@sina.com。

在身体相应部位,可测量关节角度、线性加速度和角速度等参数<sup>[5]</sup>。

目前,只有少数主要制造商(例如 Bosch、InvenSense、STMicroelectronics 等)能提供进行人体运动分析和活动监测的原始信号传感器,并将传感器与卡尔曼滤波器融合以提高输出数据的精度<sup>[6]</sup>。具有代表性的商业产品主要有 Xsens, Shimmer Sensing, BioSyn systems, I Measure U 和 APDM Wearable Technologies 等<sup>[7]</sup>。其中, Xsens 是报道最多的运动捕捉系统<sup>[8]</sup>,其利用特有的传感器和人体生物力学模型,评估人体节段的方向、位置和角度的变化<sup>[9]</sup>。目前,已有文献报道了使用 Xsens 分析人体运动期间身体各部位位置信息<sup>[9-10]</sup>和关节角度<sup>[11]</sup>的性能,然而,利用 Xsens 进行步态可靠性分析的研究仅有 2 项<sup>[7,12]</sup>。步态可靠性对区分步态参数之间的差异是代表步态之间真正的变化或仅仅是误差测量范围内的变化至关重要<sup>[13]</sup>。在将 Xsens 系统用于检查某些患者群体的病理步态之前,首先要确定 Xsens 系统对健康个体的步态重测可靠性。因此,研究的主要目的是测试 Xsens 系统在健康个体步行过程中运动学参数的可靠性。

## 1 方法

### 1.1 研究对象

第一次测试中共召集 17 名志愿者,在第二次测试中有两名志愿者未参加测试,最终有 15 名健康的年轻人接受了 2 次重测实验,其中 8 名男性,7 名女性;年龄:( $23.5 \pm 4.3$ )岁;体重:( $58.9 \pm 8.8$ )kg;身高:( $166.6 \pm 7.3$ )cm;BMI:( $21.2 \pm 2.1$ )kg/m<sup>2</sup>。纳入标准为:年龄在 18 至 50 岁之间;身体健康,没有任何已知的神经、心血管或肌肉骨骼疾病。该研究在西华大学美术与设计学院人机工效学实验室进行,实验完全符合《赫尔辛基宣言》,所有受试者均自愿参加本实验,并在实验前签署书面知情同意书。

### 1.2 实验设备

本次实验设备为 Xsens MVN Awinda (荷兰 Xsens 公司),包括 17 个 MTw 传感器。MTw 传感器是一个 6 自由度的 IMU (47 mm × 30 mm × 13 mm, 16 g),由三轴加速度计(范围:  $\pm 160$  m/s<sup>2</sup>)、陀螺仪( $\pm 2000^\circ$ /s<sup>2</sup>)和磁力计(范围:  $\pm 1.9$  Gauss)组成<sup>[14]</sup>。步态数据,包括传感器在 GCS 中的方向和位置、传感器的绝对速度、加速度、角速度和角加速度在 100 Hz 下

采样。相配套的软件为 MVN Analyze。由于本次实验只分析下肢运动学数据,因此只使用了其中测量下肢运动的 7 个 MTw 传感器。

### 1.3 数据采集

受试者在 2 个测试日分别进行 3 次步态测试,2 次测试间隔( $6 \pm 1$ )d。7 个 MTw 传感器由同一名实验员用有弹性的尼龙搭扣绑带固定在大腿外侧、小腿内测、脚背和骶骨中央上方,如图 1 所示。在每次实验开始之前,受试者先进行 2 min 热身,然后按照 MVN Biomech 用户手册中的说明,以 n 姿势(MVN Analyze 软件的一种测试前校准姿势程序)进行校准。校准成功后,受试者以自身最舒适的速度沿一条 6 米长的直线步道行走,左、右足分别采集 3 次有效数据。

### 1.4 数据处理

对于每个步行试验,取步行中一个完整的步态周期用于分析。首先将 MVN Analyze 系统收集的数据导出为 mvnx 格式文件,然后从 mvnx 文件中提取运动学参数。下肢关节角度在 Origin 软件中使用 6 Hz 低通 4 阶巴特沃斯滤波器进行滤波处理,并生成 0~100 个时间点的归一化步态周期数据<sup>[15]</sup>。

### 1.5 数据分析

时空步态参数包括步速、步长、步频、支撑相占比和双支撑相占比。对身体两侧的髋、膝和踝关节在矢状面、额状面和水平面进行以下变量计算:最大角度和关节活动度(Range of motion, ROM)。由于左右脚数据均衡,此次实验只选用右脚数据进行分析。计算每个试验日内步态参数的均值和标准差。2 次实验的重测相对信度采用组内相关系数(Intra-class correlation coefficient, ICC)进行评估,采用双向随机效



图 1 Xsens 使用部位图(安装在正面的仪器用实体表示,背面用线框表示)

Fig.1 Placements of Xsens (Frontal views are marked with solid, and dorsal sides are marked with wireframe)

应模型, 置信度为 95%。其中  $ICC \geq 0.75$  表示重复性极好,  $0.6 \leq ICC \leq 0.74$  表示重复性较好,  $0.4 \leq ICC \leq 0.59$  表示重复性一般,  $ICC \leq 0.39$  表示重复性较差<sup>[6]</sup>。测量标准误(Standard error of mean, SEM)用于评估绝对信度, 并提供重复测量的变异性信息<sup>[7]</sup>。SEM 由公式(1)计算<sup>[8]</sup>:

$$SEM = SD_1 \times \sqrt{1 - ICC} \quad (1)$$

其中  $SD_1$  为第一次测试的标准差。

如果  $SEM < 3.0$  则认为优秀, 如果  $SEM < 5.0$  则认为可接受<sup>[9]</sup>。2 次测试数据都由同一名实验员进行分析。使用 SPSS 26.0 (IBMS, NY, USA) 进行数据处理与统计分析。

## 2 结果

### 2.1 时空步态参数

表 1 列出了 2 次测试的时空步态参数均值、标准差、 $ICC$  以及  $SEM$ 。重测相对信度结果显示: 步长的重测相对信度极好 ( $ICC: 0.80$ ), 支撑相占比 ( $ICC: 0.68$ )、步频 ( $ICC: 0.64$ ) 和步速 ( $ICC: 0.61$ ) 较好, 而双支撑相占比一般 ( $ICC: 0.59$ )。绝对信度结果显示: 除步频的重测变异性可接受外 ( $SEM: 3.58$ ), 其余所有时空参数均为优秀 ( $SEM < 3.0$ )。

### 2.2 关节角度

表 2 列出了 2 次步态测试的髋、膝和踝关节在矢状面、额状面和水平面的最大角度和关节活动度 (ROM) 的结果。重测相对信度结果显示: 三个关节的角度在矢状面上的重复性极好 ( $ICC \geq 0.78$ ); 冠状面上, 除膝关节外展/内收最大角度重复性极好 ( $ICC \geq 0.79$ ), 其余角度表现一般至较好 ( $ICC \geq 0.52$ ); 水平面上, 踝关节所有角度重复性极好 ( $ICC \geq 0.77$ ), 髋关节关节角度表现较好至极好 ( $ICC \geq 0.60$ ), 而膝关节关节角度表现一般至较好 ( $ICC \geq 0.55$ )。此外, 所有关节角度的绝对信度结果均表现优秀 ( $SEM < 3.0$ )。

表 1 时空参数测试结果

Tab.1 Results of the gait spatial-temporal parameters

时空参数	第一次测试	第二次测试	ICC (95%CI)	SEM
步速/(m/s)	1.19±0.13	1.22±0.13	0.61 (0.16~0.85)	0.08
步长/m	0.64±0.06	0.65±0.06	0.80 (0.51~0.93)	0.03
步频/(步/min)	110.50±5.96	112.52±5.92	0.64 (0.21~0.86)	3.58
支撑相占比/%	0.62±0.01	0.62±0.01	0.68 (0.28~0.88)	0.01
双支撑相占比/%	0.22±0.01	0.23±0.02	0.59 (0.13~0.84)	0.01

表 2 关节角度测试结果

Tab.2 Results of the joint angles

关节角度/°	第一次测试	第二次测试	ICC (95%CI)	SEM
<b>矢状面</b>				
髋关节屈曲最大角度	29.81±2.93	29.98±2.77	0.94 (0.84~0.98)	0.72
髋关节伸展最大角度	-10.47±3.34	-10.62±3.20	0.95 (0.87~0.98)	0.75
髋关节屈曲/伸展 ROM	40.27±3.59	40.60±3.85	0.97 (0.90~0.99)	0.62
膝关节屈曲最大角度	58.30±2.52	58.34±2.69	0.94 (0.83~0.98)	0.62
膝关节伸展最大角度	0.60±2.86	0.63±3.11	0.88 (0.69~0.96)	0.99
膝关节屈曲/伸展 ROM	57.70±4.37	57.71±4.34	0.96 (0.89~0.99)	0.87
踝关节背屈最大角度	9.66±3.31	9.51±3.43	0.96 (0.87~0.99)	0.66
踝关节跖屈最大角度	-26.20±3.02	-26.49±3.27	0.78 (0.46~0.92)	1.42
踝关节背屈/跖屈 ROM	36.14±4.10	35.71±4.77	0.82 (0.54~0.94)	1.74
<b>冠状面</b>				
髋关节外展最大角度	5.51±1.70	6.03±1.85	0.58 (0.11~0.84)	1.10
髋关节内收最大角度	-5.37±1.06	-5.30±1.01	0.58 (0.11~0.84)	0.69
髋关节外展/内收 ROM	10.89±2.04	11.33±2.35	0.58 (0.11~0.84)	1.32
膝关节外展最大角度	2.83±1.69	3.08±1.51	0.81 (0.53~0.93)	0.74
膝关节内收最大角度	-2.93±1.21	-2.92±0.95	0.79 (0.48~0.92)	0.55
膝关节外展/内收 ROM	5.75±1.07	5.99±1.08	0.52 (0.03~0.81)	0.74
踝关节外翻最大角度	2.90±1.72	2.39±2.42	0.66 (0.24~0.87)	1.00
踝关节内翻最大角度	-12.22±4.60	-11.14±4.73	0.72 (0.34~0.90)	2.43
踝关节外翻/内翻 ROM	13.74±3.71	13.53±3.43	0.61 (0.16~0.85)	2.32
<b>水平面</b>				
髋关节外旋最大角度	4.52±2.01	4.37±1.73	0.77 (0.44~0.92)	0.96
髋关节内旋最大角度	-3.63±1.90	-4.21±1.96	0.66 (0.24~0.87)	1.11
髋关节外旋/内旋 ROM	8.16±1.59	8.58±1.94	0.60 (0.14~0.84)	1.01
膝关节外旋最大角度	4.56±1.66	4.08±1.64	0.55 (0.07~0.82)	1.11
膝关节内旋最大角度	-6.04±1.23	-6.04±1.05	0.56 (0.09~0.83)	0.82
膝关节外旋/内旋 ROM	10.60±2.30	10.11±2.09	0.60 (0.14~0.84)	1.45
踝关节外旋最大角度	14.92±4.75	15.28±5.67	0.82 (0.55~0.94)	2.02
踝关节内旋最大角度	-4.82±3.78	-4.63±3.01	0.80 (0.51~0.93)	1.69
踝关节外旋/内旋 ROM	19.73±4.59	19.92±5.11	0.78 (0.47~0.92)	2.15

## 3 讨论

步态分析是人体运动分析的重要手段, 在评估运动员表现、医疗康复和人机交互等领域中具有广泛的应用前景<sup>[20-21]</sup>, 但其应用范围大多局限于实验室环境<sup>[8]</sup>。随着 IMU 技术的不断成熟, 其在临床或科研分析中的应用越来越多<sup>[11]</sup>。Xsens 是目前少数几个商业上可用的基于惯性传感器的运动分析系统<sup>[9]</sup>, 且应用最为广泛<sup>[8]</sup>。为了将该技术用于人体运动分析和临床研究, 必须对其在各种运动任务中的性能

表现进行评估。目前专门报道 Xsens 评估健康个体的步态重测可靠性的文献较少。本研究旨在验证 Xsens 运动捕捉系统在 2 个不同工作日之间的步态重测信度。

与 OMC 系统相比,IMU 的传感器单元体积相对较大,这可能导致传感器和受试者皮肤或衣物之间的相对运动会造成运动伪影<sup>[5]</sup>。Besier<sup>[22]</sup>和 Mills<sup>[23]</sup>认为重测结果完全取决于测试人员自身。在本研究中,使用的 Xsens MVN Awinda 的 IMU 大小为 38 mm × 53 mm × 21 mm,质量 30 g,为了将仪器校准和测量误差降至最低,通过使用一名训练有素的研究人员对所有试验进行分段测量和校准。研究结果显示,步长在 2 次测量过程中的可靠性最高,而双支撑相占比的一致性相对较低,这可能暗示着该指标在测量过程中受到了一些变异性或测量误差的影响。此外,绝大部分参数的 SEM 值均为优秀,说明 Xsens 系统的变异性很小。这些重复性结果与之前报道的时空步态参数的可靠性结果相当<sup>[13]</sup>。综上,这些发现表明 Xsens 系统提供了可靠的步态时空参数。

在关节角度方面,髋、膝和踝关节在矢状面上均表现出极佳的重测信度,这与之前的研究结果吻合<sup>[7,12]</sup>。此外,一项系统综述<sup>[19]</sup>指出,OMC 系统在矢状面和冠状面关节上获得的 ICC 值范围为 0.5~0.99。而本研究的范围为 0.52~0.79,且所有关节的 SEM 相对较小( $SEM < 3.0$ )。这表明,从 Xsens 系统获得的矢状面和冠状面的关节角度运动学变量的可靠性与 OMC 系统获得的可靠性相当<sup>[13,24-25]</sup>。在水平面上,有研究报道 OMC 系统提供的水平面关节角度的可靠性较差<sup>[25-26]</sup>。然而,这与本研究结果不一致,三个关节的重测信度表现为一般到极好。OMC 系统和 IMU 系统之间解剖框架的差异很可能是导致差异的最主要原因<sup>[5]</sup>。由于 2 个系统的解剖框架中采用不同的旋转轴来定义和计算关节角度,这可以解释关节角度结果之间的差异<sup>[27]</sup>。此外,先前的一项研究<sup>[28]</sup>也发现,解剖框架的差异对水平面旋转角度的影响较大。总之,应谨慎比较 Xsens 系统与 OMC 系统的外旋/内旋角度。

另外,其他 IMU 系统通常通过在受试者的腰椎<sup>[29-30]</sup>或小腿<sup>[30-31]</sup>放置传感器来检测步态,许多这样的系统被证明是相当准确的和可重复的<sup>[32]</sup>,本研究与这些验证或检查惯性传感器在步态测试中的可重复性研究结果相似。因此,就健康个体的步态重测信度而言,IMU 似乎为传统的 OMC 系统提供了合适的补充方案<sup>[33]</sup>。此外,以上步态研究结果对于研

究人员、临床医生和康复专业人员具有重要意义,他们可根据重测信度的结果选择适当的步态参数指标,以确保步行过程中下肢运动学指标的可靠性。

该研究也有一些局限性。首先,这项实验的受试者是一组身体健全的成年人,且他们是在一个受控的实验环境中进行的测试,可能无法代表受试者的日常生活中的真实步态,因此还需要对日常环境进行更多研究才能推广研究结果。此外,病理步态数据的可重复性可能会低于身体健康受试者的数据<sup>[12]</sup>,需要进一步的研究来评估 Xsens 系统在病理步态中的重测可靠性。

## 4 结论

Xsens 系统在测量健康年轻人的时空步态参数以及冠状面、矢状面和水平面的下肢关节角度方面具有良好的重测可靠性。该系统的矢状面和冠状面关节角度的 ICC 和 SEM 值可与现有的“金标准”步态评估技术相媲美。总之,这些研究结果表明 Xsens 系统适用于运动分析和临床实践。未来的工作应评估该系统在复杂运动和病理人群中的可靠性,并探索该系统可为临床医生和科研人员提供信息的效度。

## 参考文献:

- [1] 蔡宗远,王少白,李国安.人体运动分析的发展与应用回顾[J].医用生物力学,2016,31(4):362-368.  
CAI Z Y,WANG S B,LI G A.Human motion analysis:A review of its development and applications[J]. J Med Biomech, 2016,31(4):362-368.(in Chinese)
- [2] 何娟娟,姚志明,李波陈,等.基于可穿戴设备的帕金森病运动迟缓检测评估方法研究进展[J].中国医疗器械杂志,2019,43(6):432-435.  
HE J J,YAO Z M,LI B C,et al.Research progress on evaluation method of Parkinson's disease bradykinesia detection based on wearable device[J].Chin J Med Instrum,2019,43(6): 432-435.(in Chinese)
- [3] LIN J F S,KULIĆ D.Human pose recovery using wireless inertial measurement units[J]. Physiol Meas,2012,33(12):2099-2115.
- [4] KIM J,COLABIANCHI N,WENSMAN J,et al.Wearable sensors quantify mobility in people with lower limb amputation during daily life[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2020, 28(6):1282-1291.
- [5] ZHANG J T,NOVAK A C,BROUWER B,et al.Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics[J].Physiol Measur,2013,34(8):N63-N69.
- [6] RAMKUMAR P N,HAEBERLE H S,RAMANATHAN D,et al.Remote patient monitoring using mobile health for total

- knee arthroplasty: Validation of a wearable and machine learning-based surveillance platform [J]. *J Arthroplasty*, 2019, 34(10): 2253–2259.
- [7] AL-AMRI M, NICHOLAS K, BUTTON K, et al. Inertial measurement units for clinical movement analysis: Reliability and concurrent validity [J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 719.
- [8] POITRAS I, DUPUIS F, BIELMANN M, et al. Validity and reliability of wearable sensors for joint angle estimation: A systematic review [J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1555.
- [9] LEBEL K, BOISSY P, HAMEL M, et al. Inertial measures of motion for clinical biomechanics: Comparative assessment of accuracy under controlled conditions—effect of velocity [J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e79945.
- [10] LEBEL K, BOISSY P, HAMEL M, et al. Inertial measures of motion for clinical biomechanics: Comparative assessment of accuracy under controlled conditions—changes in accuracy over time [J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0118361.
- [11] ROBERT-LACHAINE X, MECHERI H, LARUE C, et al. Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2017, 55(4): 609–619.
- [12] CLOETE T, SCHEFFER C. Repeatability of an off-the-shelf, full body inertial motion capture system during clinical gait analysis [C]// 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2010: 5125–5128.
- [13] AL-AMRI M, AL BALUSHI H, MASHABI A. Intra-rater repeatability of gait parameters in healthy adults during self-paced treadmill-based virtual reality walking [J]. *Computer Methods Biomech Biomed Eng*, 2017, 20(16): 1669–1677.
- [14] SCHEPERS M, GIUBERTI M, BELLUSCI G. Xsens MVN: Consistent tracking of human motion using inertial sensing [R]. Xsens Technologies BV, 2018: 1–8.
- [15] 胡明宇, 黄趋庭, 徐波, 等. 3–6 岁儿童应对视觉条件改变的膝关节角度角速度反馈 [J]. *皮革科学与工程*, 2020, 30(4): 62–66.  
HU M Y, HUANG Q T, XU B, et al. Effect of visual sampling changing on knee joint angle and velocity of children aged 3–6 [J]. *Leather Sci Eng*, 2020, 30(4): 62–66. (in Chinese)
- [16] CICHETTI D V. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology [J]. *Psychol Assess*, 1994, 6(4): 284–290.
- [17] ATKINSON G, NEVILL A M. Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine [J]. *Sports Med*, 1998, 26(4): 217–238.
- [18] BRUTON A, CONWAY J H, HOLGATE S T. Reliability: What is it, and how is it measured? [J]. *Physiotherapy*, 2000, 86(2): 94–99.
- [19] MCGINLEY J L, BAKER R, WOLFE R, et al. The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: A systematic review [J]. *Gait Posture*, 2009, 29(3): 360–369.
- [20] LEE Y S, HO C S, SHIH Y, et al. Assessment of walking, running, and jumping movement features by using the inertial measurement unit [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(4): 877–881.
- [21] 张峻霞, 高昆, 谢兵. 步态分析研究综述 [J]. *包装工程*, 2022, 43(10): 41–53.  
ZHANG J X, GAO K, XIE B. Review of gait analysis [J]. *Packag Eng*, 2022, 43(10): 41–53. (in Chinese)
- [22] BESIER T F, STURNIEKS D L, ALDERSON J A, et al. Repeatability of gait data using a functional hip joint centre and a mean helical knee axis [J]. *J Biomech*, 2003, 36(8): 1159–1168.
- [23] MILLS P M, MORRISON S, LLOYD D G, et al. Repeatability of 3D gait kinematics obtained from an electromagnetic tracking system during treadmill locomotion [J]. *J Biomech*, 2007, 40(7): 1504–1511.
- [24] KAUFMAN K, MILLER E, KINGSBURY T, et al. Reliability of 3D gait data across multiple laboratories [J]. *Gait Posture*, 2016, 49: 375–381.
- [25] MELDRUM D, SHOULDICE C, CONROY R, et al. Test-retest reliability of three dimensional gait analysis: Including a novel approach to visualising agreement of gait cycle waveforms with Bland and Altman plots [J]. *Gait Posture*, 2014, 39(1): 265–271.
- [26] WILKEN J M, RODRIGUEZ K M, BRAWNER M, et al. Reliability and minimal detectable change values for gait kinematics and kinetics in healthy adults [J]. *Gait Posture*, 2012, 35(2): 301–307.
- [27] BRENNAN A, DELUZIO K, LI Q. Assessment of anatomical frame variation effect on joint angles: A linear perturbation approach [J]. *J Biomech*, 2011, 44(16): 2838–2842.
- [28] CROCE U D, CAPPOZZO A, KERRIGAN D C. Pelvis and lower limb anatomical landmark calibration precision and its propagation to bone geometry and joint angles [J]. *Med Biol Eng Comput*, 1999, 37(2): 155–161.
- [29] GONZÁLEZ R C, LÓPEZ A M, RODRIGUEZ-URÍ A J, et al. Real-time gait event detection for normal subjects from lower trunk accelerations [J]. *Gait Posture*, 2010, 31(3): 322–325.
- [30] MOON Y, MCGINNIS R S, SEAGERS K, et al. Monitoring gait in multiple sclerosis with novel wearable motion sensors [J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171346.
- [31] MANCINI M, HORAK F B. Potential of APDM mobility lab for the monitoring of the progression of Parkinson's disease [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2016, 13(5): 455–462.
- [32] IOSA M, PICERNO P, PAOLUCCI S, et al. Wearable inertial sensors for human movement analysis [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2016, 13(7): 641–659.
- [33] 冯雨果, 刘宇, 周晋. 可穿戴惯性传感器在全膝关节置换术后步态分析中的应用进展 [J]. *皮革科学与工程*, 2023, 33(6): 52–58.  
FENG Y G, LIU Y, ZHOU J A. A review of gait analysis after total knee arthroplasty using wearable inertial measurement sensors [J]. *Leather Sci Eng*, 2023, 33(6): 52–58. (in Chinese)