

【特别策划】

步态分析研究综述

张峻霞, 高昆, 谢兵

(天津科技大学 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

摘要: **目的** 梳理步态分析的发展脉络, 介绍步态分析中常用的实验和仿真方法, 了解步态分析的主要应用领域, 预测步态分析未来的发展方向。**方法** 收集步态分析领域的国内外主要文献, 梳理该领域的主要研究内容、研究方法、研究现状和主要应用领域。**结果** 步态分析的主要研究内容是对运动学、动力学参数及其变化规律的定量研究, 多数学者将研究集中在临床诊断与康复评价、穿戴式机器人及康复辅具研发与竞技体育科学训练方式探索上; 步态分析的研究方法包括实验研究和仿真分析法; 步态分析的研究成果可以为医疗领域中相关疾病的临床诊断、疗效评估和康复训练提供指导意见, 为工程领域中双足机器人、助行器及康复辅具、人工关节的设计开发提供数据支撑。**结论** 未来步态分析手段将更精准、应用领域将更广泛, 步态分析的应用也将扩展到更多领域, 工业设计也将持续引入步态分析的方法与成果, 为用户带来更好的产品和更舒适的体验。

关键词: 步态分析; 运动捕捉; 表面肌电; 足底压力

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)10-0041-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.10.005

Review of Gait Analysis

ZHANG Jun-xia, GAO Kun, XIE Bing

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper is to sort out the development of gait analysis, introduce the experimental, simulation methods and the main application areas of gait analysis. The future development direction of gait analysis was forecasted. The main literatures about gait analysis were collected, reviewed, and the main research contents, research methods, research status and main application fields of gait analysis were sorted out. The main research content of gait analysis is the quantitative research on kinematics and kinetic parameters, and their changing laws. Most scholars focus their research on clinical diagnosis and rehabilitation evaluation, research and development of wearable robots and rehabilitation aids, and exploration of scientific training methods in competitive sports. The research methods of gait analysis include experimental research and simulation analysis; The research results of gait analysis can provide guidance for clinical diagnosis, efficacy evaluation and rehabilitation training, provide data support for the development of biped robots, walking aids, rehabilitation aids and artificial joints. In the future, the gait analysis method will be more accurate and the application field will be more extensive.

KEY WORDS: gait analysis; motion capture; surface electromyography; plantar pressure

工业设计领域始终将“人”作为设计的核心要素。“以人为本”“人性化关怀”的理念贯穿了工业设计发展的始终。设计一款优秀的用户体验产品, 需要充分了解人的生理结构、运动方式、脑力体力工作负荷,

以及人体的信息处理系统等多方面要素。步态分析作为研究人体运动过程变化的常用方法, 为穿戴式设备、康复辅具等产品的设计提供了基本的理论支撑。文中拟梳理近年来国内外步态分析领域的相关文献,

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(50975204)

作者简介: 张峻霞(1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为仿生健康与康复机械系统。

对步态分析领域的研究现状进行归纳与总结,以期梳理出其发展脉络,预测未来的发展方向。

1 步态与步态分析

行走是日常生活中最主要的运动方式,是指通过双侧下肢的周期性交替动作实现机体移行的特征活动。一个完整步态过程起始于神经系统发出指令,肌肉系统通过牵拉骨骼使其围绕关节运动。该过程需要人体各系统分工协作,是一项极其复杂的运动。步行不仅囊括了髋、膝、踝关节屈伸和内外旋展,还涉及人体重心移位、骨盆倾斜旋转等相关运动^[1]。

步态是人类步行的行为特征^[2]。不同的人因体质与运动习惯的不同,其行走方式和风格存在显著差异。人体运动协调系统、个人行为习惯和心理活动等因素都会影响步态变化的方式^[3]。

步态分析是对步态特征的科学描述。随着现代测量技术的发展,步态分析逐步从定性研究转变以人类行走时身体各部分为对象的运动学、动力学定量研究,步态分析也逐渐发展为生物力学的一个重要分支。步态分析不仅是探究步态变异内在诱因的必要手段,也是揭示行走过程中维持稳定机理的重要方法。

1.1 步态分析的发展历程

人类对步态的研究具有很长的历史。公元前

400~300 年,古希腊的亚里士多德就开始注意到步行运动^[4]。16 世纪初,欧洲人为了预测赛马和赛狗的胜出机会,开始研究动物在跑步中的动作,采用连续录像的方式记录动物周期性的肢体位置并进行分析^[5]。17 世纪,人们开始将力学与解剖学相结合研究人和动物的运动协调规律^[2]。19 世纪照相机和摄像机的发明将人体步态分析的研究进展带入了新的时代。美国人迈布里奇用 24 架相机拍摄了马奔跑动作的连续照片,并利用照片计算必要的参数,这是客观进行运动学步态分析的开始,奠定了影像测量和分析的方法基础。随着现代科技的发展,到了 20 世纪 60 年代,计算机的出现可以被视为步态分析研究的分水岭,它开启了步态分析研究的数字化时代^[2]。借助计算机的强大计算能力,科研人员可以系统地对实验采集到的步态数据进行量化分析。在此基础上,特别是三维空间运动分析系统的研发,使人们对步行的简单描述转变为从生物力学角度的定量分析。步态分析发展过程中颇具意义的重大技术发明和历史事件,见表 1。

此外,表面肌电测量系统、足底压力测量系统等高精度设备不断出现,为相关研究的实验设计提供了更大的可能。借助新的实验设备,诸如肌电分析、足底压力分布分析等被逐步应用到步态分析中,使步态分析更加全面,极大地拓展了步态分析的应用领域。

表 1 步态分析的发展历史
Tab.1 Development history of gait analysis

时间	代表性人物	典型事件	意义
公元前 400~300 年	古希腊哲学家 亚里士多德	开始关注步行运动	对人体行走认识的初端
15 世纪初	意大利 达·芬奇	对尸体进行解剖学实验	首次提出了人体运动服从于力学的观点
17 世纪	意大利 阿尔芳泰·鲍列里	在其著作《论动物运动》中首次将力学与解剖学相结合研究人和动物的运动协调规律	发表了运动杠杆定律测定人体重心位置的实验资料
19 世纪初	德国 韦伯兄弟	通过肉眼观察,用素描和绘画的方法描述步态	首次对人体步行进行力学分析
19 世纪末	美国 埃德沃德·迈布里奇	用 24 架相机拍摄了马奔跑动作的连续图片,利用照片计算必要的参数	是客观地进行运动学步态分析的开始,影像测量分析方法的奠基
20 世纪初	德国 布劳恩·费舍尔	解剖实测获得人体关节惯性参数,建立了第 1 个人体质量分布模型	人体运动定量分析的奠基
20 世纪 30 年代	英国生理学家 希尔	测量了肌肉收缩张力与速度的关系,并基于热力学原理建立了与实验结果一致的希尔方程	奠定了人体行走过程中肌肉力学的理论基础
二战期间	美国 医务和技术人员	制定了改进假肢、肢具的具体计划,服务于伤残军人	首次结合运动学和动力学技术进行步态分析
20 世纪 60 年代	各界技术人员	三维空间综合运动分析系统研发成功	从生物运动学方面定量分析人体运动状态,使步态的研究进入定量研究阶段

1.2 步态分析的主要内容

在人体行走过程中, 从一侧脚跟着地起到该脚跟再次着地为止, 构成了一个完整的运动周期, 称作步态周期。在一个步态周期中包含了一系列典型位姿的变化, 每个典型位姿变化对应着一个时段, 称作步态时相: 支撑时相 (Stance Phase) 和摆动时相 (Swing Phase)。步行中足与地面始终有接触的阶段为支撑时相, 否则为摆动时相, 见图 1。

描述步态的参数包括时-空参数、运动学参数和

动力学参数三大类。在步态时空参数中, 除了步态周期和步态时相, 还包括: 步速、步频、步长、步幅、步宽、步向角等。健康人通常行走的速度约为 65~95 m/min, 步频大约是 95~125 步/min。步长指的是行走时左右足跟 (或趾尖) 间的纵向距离, 又称单步长, 见图 2 中 A; 步幅也称为跨步长或复步长, 是同侧足跟 2 次着地间的距离, 所以通常是步长的 2 倍。见图 2 中 B; 步宽是两脚跟中心点或重力点之间的水平距离, 见图 2 中 C; 行走中前进的方向与足的长轴所形成的夹角称为步向角, 健康人约为 6.75°, 见图 2 中 D。

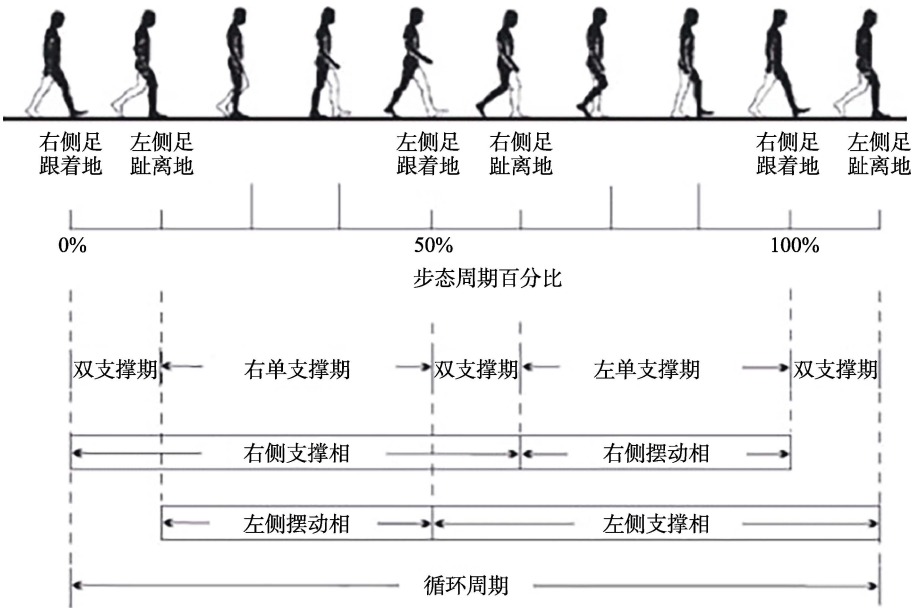


图 1 步态时相划分
Fig.1 Gait phase division

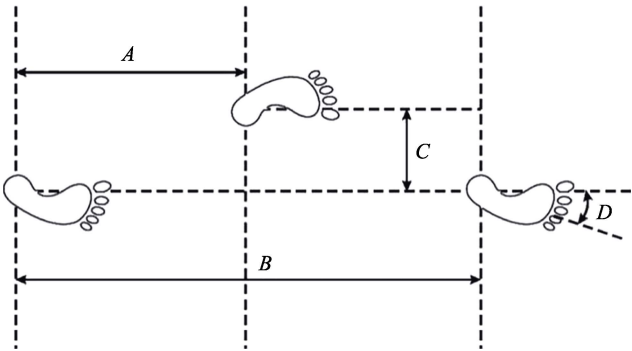


图 2 步态的空间参数
Fig.2 Gait spatial parameters

运动学参数是指人体解剖学上关键点的位移、速度和加速度, 以及关节角度、角速度和角加速度, 用以描述人体的空间运动情况。在步态分析中, 将躯干、大小腿、足等近似为刚体, 关节角度是指在某一解剖学平面 (矢状面、额状面、水平面) 内的角度, 通常针对髋、膝、踝 3 个关节角度进行研究。膝关节是典型的铰链结构, 只能在矢状面内进行屈伸运动, 而踝、髋关节可以在 3 个解剖学平面内进行屈/伸、内收/外展以及内旋/外旋运动, 人体下肢自由度见表 2。虽然步行以矢状面内的运动为主, 但髋关节和踝关节的其他运动在步态研究中也非常重要。

表 2 人体下肢自由度
Tab.2 Human lower limb freedom

关节名称	矢状面自由度	冠状面自由度	水平面自由度
踝关节 Ankle joint	跖屈 Plantarflexion /背屈 Dorsiflexion	外翻 Eversion /内翻 Inversion	外旋 Extension /内旋 Flexion
膝关节 Knee joint	伸展 Extension /屈曲 Flexion		
髋关节 Hip joint	屈曲 Extension /伸展 Flexion	外展 Abduction /内收 Adduction	外旋 Extension /内旋 Flexion

动力学参数主要包括足-地接触力、关节力矩、重心加速度等。

正常人足-地接触力在水平、前后方向较小且基本对称,垂直方向分力(GRF)呈双峰型,见图3。关节力矩是指肌肉、韧带和关节摩擦及结构约束产生的所有内力矩的净值。利用逆向动力学分析法,根据地面反作用力和关节角度曲线,可以计算出净关节力矩^[7]。人在行走时,身体重心不仅在前进方向,而且在垂直方向上也不断改变着位置和速度,因此身体重心加速度也是一个重要的动力学参数。

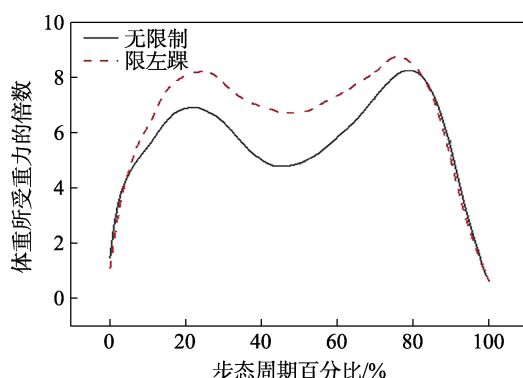


图3 典型的垂直 GRF 双峰曲线
Fig.3 Typical vertical GRF bimodal curve

2 步态分析的实验方法

2.1 实验方法的发展

在步态分析的初始阶段,实验多以观察法和初级的影像解析法^[8-11]为主。该方法成本低、应用方便,但存在着一定缺点,当受试者群体较大时效率极低,限制了研究的全面性;受设备、实验人员等主观因素影响较大,不利于实验结果的准确性及可靠性。

从最初通过绘图等方式记录人体变化到后来借

助高速摄像机、三维运动捕捉系统等应用的现代影像解析法,步态分析逐步向定量分析深入。

华中科技大学付艳等^[12]研究者便是借助 Vicon 三维步态分析系统进行了肢残者运动姿态识别的研究。Chen 等^[13]在基于混合预测模型的骨关节炎步态采集与分析系统研究中使用 RGB-D 相机和开发的步态数据记录软件为骨关节炎患者构建步态采集平台,该步态分析系统可以定量预测步态异常、描述膝关节的功能,并定量记录关节状态,可以很好地补充来自医学成像的关节结构信息。Fliker 等^[14]建立了视觉步态实验室,提出了一种用户友好的步态分析方法。还有研究者使用无线加速度计评估膝骨关节炎(KOA)患者的步态特征,使 KOA 患者的步态得以定性和定量的评估,具有很强的临床意义。此外,还有尝试应用 Kinect 传感器^[15]与跑步机^[16]等设备进行步态分析的诸多研究。

2.2 常用实验设备

常见用于步态实验的设备可分为三大类:运动捕捉系统、表面肌电系统和足底压力测量系统。

1) 光学运动捕捉系统。借助红外高速摄像机捕捉人体在三维空间内的运动轨迹变化,并通过空间坐标的形式输出数据。在光学动作捕捉行业,由英国 OML(Oxford Metrics Limited)公司设计开发的 Vicon 系列产品凭借起步早、精度高、拓展性强等优势,被广泛应用于步态分析中,见图4。在该领域中,应用较为广泛的除英国 Vicon 外,还有 Motion Analysis、Optitrack、Nokov 等品牌。这些产品在运动分析^[17-18]、外骨骼机器人^[19-20]、无人机产品研发^[21]以及影视、游戏行业^[22]中都发挥了重要作用。测力台配合光学运动捕捉系统使用,可以同步输出人体运动时地面支反力、各关节力和力矩等动力学参数^[23-25]。市场上较为知名的产品包括美国 AMTI 系列测力台、瑞士 Kisler



图4 Vicon 运动捕捉系统
Fig.4 Vicon motion capture system

测力台等, 都能够实现高精度测量。

2) 表面肌电测量系统。实时采集人体运动中肌电信号的变化, 经过放大、滤波及模/数转换, 形成量化的肌电波形及数据。因其安全、无创测量的优点

在康复医学工程界及生物力学研究中备受关注^[23]。Noraxon 公司开发的 Telemyo 表面肌电测量系统是典型代表, 该系统可与 Vicon 动捕系统同步测量, 可以更详细地描述步态特征^[26], 见图 5。



图 5 Telemyo 表面肌电测量系统
Fig.5 Telemyo surface electromyography measurement system

3) 足底压力测量系统。足底压力对分析人体运动中的平衡及稳定性有着重要的意义。通过实验测得足底不同分区的压力、压强等参数, 可以得到不同群体在不同工况下的运动变化情况, 还能反映出不同足部结构。如: 扁平足、高足弓等对人体运动的影响^[27-28]。目前较常用的是鞋垫式压力测量系统^[29], 包括美国的 F-scan 系统、德国的 Novel Pedar-X (见图 6) 系统和比利时的 RSscan 系统。

在步态实验中, 常将运动捕捉系统、表面肌电和足底压力测量系统相结合, 同步采集数据。Vicon 动作捕捉系统配套的 Nexus 软件具有较高的可拓展性, 通过预留的数据接口可以快速将测力台、表面肌电、足底压力测量设备等集成进来, 同步记录数据, 操作界面见图 7。



1—压力鞋垫; 2—连接线; 3—蓝牙接收装置; 4—数据传输光纤;
5—USB适配器; 6—弹力绑带; 7—电池及连接线; 8—电池充电器;
9—触发装置; 10—蓝牙密码狗。

图 6 Novel Pedar-X 足底压力测量系统
Fig.6 Novel Pedar-X plantar pressure measurement system

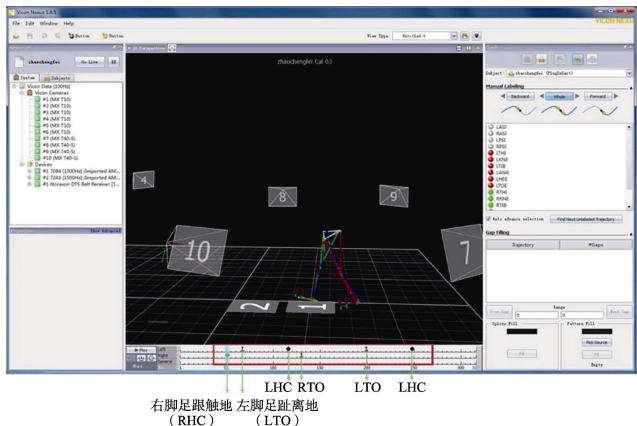


图 7 集成了测力台和肌电系统的
Vicon Nexus 软件界面
Fig.7 Vicon Nexus software interface integrating
dynamometer and EMG system

3 步态分析的仿真方法

逆向动力学是指根据物体的运动表象利用力学规律, 求解使物体发生变化的力表达^[30]。在生物力学研究中, 借助步态实验数据, 研究者根据研究需求,

可通过逆向动力学方法求得肌肉力矩等参数^[31]。基于逆向动力学原理开发了多款适用于步态分析仿真的软件。目前较为成熟的有 AnyBody、Opensim、LifeMOD 等。

3.1 AnyBody 软件仿真

AnyBody Modeling System (以下简称 AnyBody) 是由 AnyBody Technology A/S 公司开发的一款生物力学分析软件^[32-34], 可以同时计算模型中的骨骼、肌肉和关节的受力、变形, 以及肌肉活性、肌腱的弹性势能、拮抗肌肉作用等生理参数, 广泛应用于临床医学、汽车工业设计、航空航天、康复医学工程、骨科产品设计、工作环境设计, 以及体育运动与器械等研究领域, 并取得了较好的效果^[35-40]。AnyBody 使用 AnyScript 脚本语言, 包含了关于人体模型、环境模型以及人体-环境模型之间的约束组成等, 用户可以应用该语言自定义人体模型的骨骼、关节、肌肉以及约束、驱动等参数, 也可以导入并调整机构 CAD 模型, 与人体模型进行连接。

AnyBody 系统中的人体模型包括骨骼模型和肌肉模型 2 部分。由于实际的人体模型形状复杂, 虽然可以通过编写脚本的方式自行建立, 但较为耗时。通常可以调用 AnyBody 软件提供的人体模型库——AMMR 内置的模型, 按照一定比例缩放就能满足不同产品的设计需求^[41]。耿治中^[42]应用 AnyBody 研究足球运动员侧切动作触球时的下肢生物力学特性, 为预防运动员腿部肌肉拉伤提供训练指导意见。吉林大学 Qian 等^[43]学者验证了 AnyBody 全身肌肉骨骼模型在计算 L4、L5 腰椎负荷时的适用性, 证明了 AnyBody 仿真作为一种非侵入式研究手段可以有效应用于腰椎负荷研究中。还有学者将 AnyBody 仿真应用于汽车座舱的人机工程学研究, 通过考虑骨骼肌肉的特征来指导汽车操纵部件的人机交互设计^[44], 也有文献用该软件研究汽车驾驶员坐姿的力学特性, 为汽车座椅支撑性设计提供参考^[45]。天津大学的高飞等^[46]基于 AnyBody 对自行车骑行运动展开了仿真与试验分析, 辅助自行车车架结构的设计。此外, AnyBody 仿真方法也被用于理疗床等健身器材与康复辅具的研发中^[41,47], 通过在软件中进行人机耦合仿真, 测试设备的功能与人机工程设计合理性。在外骨骼机器人开发中, AnyBody 仿真为验证机器人控制策略的有效性提供了帮助^[48]。AnyBody 也常被用于动物的生物力学分析, 例如新西兰研究者 Alienor^[49]构建了马的前肢肌肉骨骼模型, 研究马的肌肉、肌腱和韧带的负荷, 预防因肌肉骨骼损伤问题导致的马死亡。

AnyBody 还被广泛应用于体育运动学研究中。通过在软件中对运动方式进行仿真分析, 可以获得运动中各关键肌肉的参数, 从而帮助教练员制定训练计划, 为专业运动员竞技成绩的提升提供帮助。

3.2 Opensim 和 LifeMOD 软件仿真

在生物力学分析中另一代表性的仿真工具是 Opensim。这是一款由斯坦福大学研发的基于 C++ 和 Java 语言的用于建立肌肉模型、仿真与分析的开放性软件。在 Opensim 中, 各个关节将多块骨骼连接起来, 肌肉附着在骨骼上并通过肌肉产生的力来带动关节运动, 各式不同的模型被应用于行走动力学分析、运动表现研究、手术过程仿真、医疗器械设计等诸多领域。Opensim 在全球上百个生物力学实验室中应用, 并拥有一个活跃的开发者社区来不断完善其功能^[30]。英国索尔福德大学的 Trinler 等^[50]对比分析了在 Opensim 与 AnyBody 软件中的 2 套脑卒中患者步态模型, 发现虽然 2 种建模方法不同, 但得出的肌肉力量在波动模式上非常相似。新泽西州立大学的 Mahadas 等^[51]利用 Opensim 研究了高尔夫运动中挥杆姿势带来的影响。

LifeMOD 是一款步态分析常用的仿真软件。为了研究在不同工况环境下人体生物力学参数的变化, 可以在 LifeMOD 中构建人体模型进行仿真。此外, 由于 LifeMOD 是基于 Adams 系统开发的, 还能将 Adams 中的机械模型快速导入, 从而研究人体与机械系统的耦合情况^[30]。南京体育学院的钱竞光等^[52]借助 LifeMOD 软件探究了体操吊环慢用力动作肌肉发力特点和时序, 为专项力量训练制定个性化方案提供理论参考和实践指导, 创建的首个“吊环十字压上成水平十字支撑”慢用力动作组合动力学模型实现了该动作的动力学仿真, 解释了动作过程中肌肉的用力特点和基本规律。西北工业大学的薛红军等^[53]基于 LifeMOD 人体肌肉骨骼模型, 建立了含有肌肉力单元的飞行员人体动力学仿真模型, 研究了飞机座舱人机界面的优化设计。清华大学的马妮等^[54]基于 LifeMOD, 对比健康人与接受人工膝关节置换术群体步行时的生物力学特征变化情况, 探究了人工假体对人体日常活动的影响, 并建立了一套针对人工膝关节置换人士的步态模型。

还有部分学者的研究对比了 3 款不同的仿真软件, 为相关研究领域应用仿真类生物力学分析软件提供了一定的指导意见^[55]。奥地利萨尔茨堡大学的 Alexander 等^[56]研究了不同步行速度对使用 AnyBody 和 OpenSim 估计关节和肌肉力的影响; 英国学者 Trinler 等^[50]对比了不同软件在脑卒中康复患者步态分析中的仿真结果, 指出不同仿真软件在肌肉激活模式上的一致性较强, 但不同软件环境中肌肉骨骼模型的建模方法差异导致输出的肌肉力数值存在差异, 研究者要考虑真实的应用环境, 有针对性地进行选择。

4 步态分析的应用领域

近年来, 步态分析被广泛应用于医学、工学等领

域的研究中,包括临床医疗诊断和康复训练,机器人、人工关节的设计,助行器及康复辅具的研发。除此之外,在竞技体育训练、生物特征识别和提取等研究中,步态分析也发挥了重要的作用。随着步态分析的不断发展,相关成果的应用领域也在持续拓展中。

4.1 医学诊断及康复领域的应用

步态分析有助于临床疾病的诊断。越来越多的医疗从业者注意到,许多疾病对人类机体造成的影响会通过步态的形式展现出来。在医学上,步态分析主要应用于临床疾病的诊断、治疗手段有效性验证以及康复训练方面。近年来,与三维步态分析临床疗效的相关文献大量增加,这些研究成果有助于不断改进数据的全面性与可用性,促进了研究者对步态病理学和治疗的理解,也证明了步态分析在改变治疗决策、提高临床医生对病情的掌握程度和改善患者术后疗效方面的功效。

作为人体神经肌肉骨骼系统协调运动的外在表现,人体的步态特征是临床诊断中不可缺少的依据之一。通过采集患者的病理性步态数据,借助步态分析,提取该症状对应的关键步态特征与不同病程下步态的差异性,从而在临床诊断中,帮助医生更好地判断患者是否罹患相关疾病^[57]。刘铭等^[58]在阿尔茨海默病(AD)的早期诊断和鉴别研究中证实,步态分析可作为认知衰退的一种重要临床标志物,步态分析对于AD的早期识别和诊断具有较好的临床价值,通过更多的步态运动学分析法以拓展更多具有临床意义的步态参数对今后临床上快速识别和辅助诊断AD有着重要意义。白森等^[59]通过对成人型脊柱畸形(ASD)患者运动功能进行三维步态分析,得到ASD患者的步态特征,进一步熟悉了ASD患者下肢功能的病理生理变化,为ASD患者的临床诊疗和术后康复提供理论依据。O'sullivan等^[60]研究了脑瘫患者在不进行手术干预的情况下屈膝及重复步态的发展方向。韩国学者Kim^[61]在有关帕金森病(PID)亚型聚类的相关研究中发现,在现有的临床诊断中,经常通过医师经验对帕金森病的多种亚型进行判定分类。研究者对88名PID患者进行18电子发射断层扫描,并进行了三维步态分析,使用步态时空参数中的步速、步幅和步宽等进行聚类分析,将患者分为4个亚组,并对组间的步态运动学动力学参数差异进行比较。同样,也有学者在研究糖尿病多发性神经病的过程中对患者的定量步态和姿势进行分析,得出步态与糖尿病性神经病的临床严重程度显著相关的结论,并提出步态和姿势分析是评估糖尿病性神经病步态的有效工具的新思考^[62]。Tsuchiya等^[63]在对多系统萎缩症(MSA)中膀胱功能障碍与运动障碍间的关系。还有关于利用三维临床步态分析手段研究不完全脊椎损伤的案例^[64],这些研究成果均证明了步态分析研究成果可以为医师提供临床指导。

步态分析对患者术后康复及疗效评估的意义也非常重要。格林巴利综合征(GBS)是一种周围神经炎症疾病,属于罕见病。步态异常是格林巴利综合征患者的常见症状。研究人员通过步态实验,使用Vicon三维运动捕捉系统,对25名患儿的步态特征进行综合分析,证明了尽管GBS儿科患者的神经系统、体态特征和术中治疗方案是相似的,但他们在术后康复期间的步态模式却不同。通过步态分析,研究人员将康复期内的患儿划分为3个不同组别,有助于康复医师制定不同的康复计划^[64]。

通过对比患者治疗前后步态特征的变化,可以有效判断疗效及恢复情况。单莎瑞等^[65]通过三维步态分析,研究了低频重复经颅磁刺激对偏瘫步态的影响,证明了低频重复经颅磁刺激能在一定程度上改善患者偏瘫步态。潘浩等^[66]通过比较运动学对线与机械力学对线2种不同方式指导全膝关节置换术后患者的步态特征,得出了运动学对线膝关节置换术能更有效地降低膝关节内收力矩的结论。Lamas等^[67]通过步态实验研究了腰椎管狭窄症(LSS)患者手术前后步态特征,发现LSS患者普遍存在骨盆倾斜和髌关节屈曲增加的症状,在接受腰椎减压手术后,患者的骨盆倾斜度与髌关节屈曲值正常化。研究人员指出,在静态X光片上无法观察到LSS患者运动中骨盆倾斜度的特殊性,这说明步态分析能够很好地检测步行等运动中身体的动态变化,其作为一种新的诊疗手段,有效弥补了X光、核磁共振等传统的静态影像学的不足。此外,也有研究者通过长期随访膝关节肌腱断裂者术后步态表现,对治疗方案与术后恢复进行评估^[68]。

作为医疗过程的重要组成部分,医患双方都逐渐注意到康复训练的重要性。在物理康复领域,步态分析的主要功能包括^[69]:康复前肢体功能水平的评估;临床诊疗及个性化康复方案制定;人工假体的功能性测试;术后疗效的判定。目前,步态分析被大量应用于脑卒中、偏瘫、骨性关节炎等疾病的康复治疗中。张晶晶等^[70]通过对脑卒中偏瘫患者步态特征分析,指出造成偏瘫患者常见的足下垂内翻、划圈步态的主要原因在于踝关节功能差和小腿肌肉力量弱。在步行康复训练中应着重加强小腿肌肉力量的训练,缓解局部肌张力,提高踝关节功能。殷可意^[71]在老年女性膝骨关节炎(KOA)患者步态适应性运动特性研究中用步态分析的方式对KOA群体步态过程中的生物力学特征进行了研究,得出了KOA患者独有的下肢代偿方式。同样的,在探究全髌关节置换术中微创前路入路术型对患者术后康复过程影响^[72]时发现,接受治疗后患者需要1年以上的时间来建立新的下肢运动补偿机制,包括臀中肌和臀大肌的最大等长肌力下降,以及矢状面和额状面的相关运动学动力学参数的改变,为医师制定康复计划提供了一定的参考。Blasiis等^[73]在一项评估Nabiximols药物对多发性硬化症患者影

响的研究中也突破性地引入了步态分析手段,通过对患者痉挛状态时行走和平衡能力的分析,得出该药物对患者的短期与长期影响。

随着步态分析不断发展,一些学者将动物作为实验对象,为人体临床治疗方案提供动物实验参考。Hofman 等^[74]在小动物骨折愈合模型研究中建立了准确的步态分析方法,用于评估下肢骨折对大鼠步态模式和肌肉萎缩的影响,其研究结果奠定了未来骨折愈合步态分析领域的基础,提高了人们对下肢骨折后骨再生和康复的认知。同样以大鼠作为研究对象,Wu 等^[75]通过观察大鼠跟腱愈合过程中步态特征的变化,以及转化生长因子和创面愈合因子的表达情况,研究步态分析用于评估肌腱愈合的可行性。研究发现,步态特性与跟腱愈合有关。这一研究成果对未来人类骨折后愈合的研究也具有参考价值。此外,还有学者使用步态分析系统证明了理想化的前交叉韧带重建模型在小型猪中的生物力学稳定性,确定了理想化的前交叉韧带重建可用于帮助机体恢复正常的步态特征^[76]。

在与人体运动及康复相关的步态研究中,许多学者和研究人员建立了各式步态分析模型与步态评价系统。这些成果对步态分析的精细化、多元化、标准化发展起到了一定的推动作用。顾琳燕^[77]运用步态分析的手段,分析比对普通人与运动功能障碍者的典型步态参数,提出了基于步态分析的同步下肢运动康复治疗与康复评价系统。随着脑瘫步态训练中生物反馈研究的兴起,Flux 等^[78]在与脑瘫患儿群体相关的研究中,通过对步态运动学进行实时测量,对比了用于脑瘫儿童步态分析的人体模型与传统步态模型之间的差异。此外,还有一些学者使用步态分析的手段验证了现有研究模型和系统的有效性与可重复性^[79-80]。

4.2 工程学与体育训练领域的应用

近年来,步态分析研究与机器人学结合得越来越紧密,有关外骨骼下肢康复机器人的研究逐渐增加。双侧下肢的对称性与人机耦合性研究是当下的热点问题。有研究发现,在单任务行走时,患有脑部小血管疾病的老年人步幅更短、步速更快、步态不对称和相位协调指数更高^[81]。复旦大学陈一等^[82]也在脑卒中患者步态周期各时相中下肢肌肉的表面肌电特点研究中指出,脑卒中患者双下肢相关肌肉肌电活动发生了明显改变,失去规律性。脑卒中患者下肢在摆动相阶段,腓肠肌的用力程度大于胫骨前肌,这种情况与健侧下肢相反。对这类导致双侧下肢运动不对称的疾病,在外骨骼下肢康复机器人的设计上也要做出改变。例如北京航空航天大学王海虎等^[83],针对非对称步态现象进行了带膝关节非对称被动行走器的步态动力学建模与分析,进一步完善了双足机器人的研究工作,还可以为临床病理性非对称步态治疗、外骨骼助力设备研制提供理论指导。

在工程学领域,步态分析及人体行走稳定性的相

关研究同样被广大科研人员所关注。在外骨骼机器人开发、康复辅具设计和人工关节研制中,均应用了步态分析的相关研究成果。外骨骼机器人作为一种可穿戴设备,对人机耦合性能有着极高的要求。这就需要机器人能够准确识别并跟随穿戴者完成一系列复杂动作。在外骨骼机器人的研发中,借助步态实验,开发者获得大量不同复杂环境条件下的人体步态数据,并以此作为机器人运动控制策略的制定依据。高亮^[84]通过分析人体下肢的运动机理和步态规律,测得人体关节的运动数据后推导用于处理离散关节运动数据的3次样条插值函数,为下肢康复机器人设计开发奠定了基础。哈尔滨工业大学谢峥等^[85]基于实时步态分析,开发出行走辅助外骨骼机器人系统,该系统借助足底压力传感器实时对使用者的步态进行分析,通过步态时相的划分,针对各步态时相提出不同的机器人控制策略。

在康复辅具及人工关节的研发中,常将步态分析应用于产品有效性的验证上。上海理工大学徐兆红等^[86]通过分析踝关节的运动模式,设计开发了可左右摆动的踝关节康复器具。跟腱损伤通常使用一种稳定靴来辅助康复治疗,Sommer 等^[87]在对现有稳定靴进行穿戴行走步态实验后,对产品效果进行了评价,并指出未来的研究需要确定最相关的变量来表示跟腱再次断裂的风险,以便得出哪种靴子最适合在临床实践中使用。上海交通大学周海^[88]将运动捕捉系统应用于人工髋关节假体的设计与临床置换术研究中,为相关假体的设计研发提供参考,并开发了以中国人为样本的运动学数据库。Lullini 等^[89]将研究重点放在不同的假体设计会给患者带来怎样的功能影响上,通过对接受2~3组件和2种踝关节置换术后患者的随访,研究人员通过患者的步态分析比较了这2种用于保持踝关节韧带等距的踝关节假体的临床功能结果。此外,也有学者借助步态分析的方法,比较评价了传统全膝关节置换与模块化股骨远端巨型假体2种不同治疗方案的效果^[90]。

步态分析也被用于研究行走稳定性与预防滑跌的相关实验中。Dommershuijsen 等^[91]为居住在西欧的老年人群体制定了步态速度的参考值,并进一步探讨了年龄、性别、身高与步速的关系。还有研究人员通过分析老年人步态过程中足底压力分布的变化,研究了影响老年人行走稳定性的因素,可为预防老年人滑跌研究提供参考^[92]。

在体育训练方面,步态分析有效地帮助教练员制定科学的训练计划,根据不同运动员的项目与技术特点,有针对性地帮助他们提高运动成绩,避免伤病。陈平波^[93]利用步态分析方法研究大负荷训练对武术运动员的步态时空参数、关节角度变化等的影响,找出步态指标变化规律及特点,从而帮助教练员掌握运动员的身体机能状态,合理安排训练计划。广州体育

学院高涵^[94]在篮球运动员受伤后的科学训练研究中归纳出一套有助于矫正病理性步态的方法,有效减少了运动员受伤部位在运动中承受的压力。通过分析篮球运动员的步态特征,归纳总结出一套正确的步态训练方法,使受损伤运动员的步态由病理性步态变为健康的步态,减少受损伤部位的压力。

5 结语

科技的进步将为步态分析提供更精准、更先进的设备,使步态分析的角度越来越全面。步态分析应用领域也将从医学、体育等传统领域扩展到更多领域,例如目前已经开始在人体生物特征识别、模式识别、军工装备领域的研究中应用了步态分析的方法。未来,步态分析的研究还将逐步应用于水下^[95-96]、航天这类特殊重力环境下的探索中。

作为步态分析的主要研究对象,人的运动方式及感受始终是研究者关注的重点,在这一点上同工业设计不谋而合。未来的工业设计与人机工程研究将持续引入步态分析的方法与成果,共同为用户带来更好的产品和更舒适的体验。

参考文献:

- [1] 古恩鹏,刘爱峰,金鸿宾,等.步态分析在临床骨科与康复中的应用[J].中国中西医结合外科杂志,2011,17(3):335-337.
GU En-peng, LIU Ai-feng, JIN Hong-bin, et al. Application of Gait Analysis in Clinical Orthopedics and Rehabilitation[J]. Chinese Journal of Surgery of Integrated Traditional and Western Medicine, 2011, 17(3): 335-337.
- [2] 励建安,孟殿怀.步态分析的临床应用[J].中华物理医学与康复杂志,2006,28(7):500-503.
LI Jia-nan, MENG Dian-huai. Clinical Application of Physical Gait Analysis[J]. Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2006, 28(7): 500-503.
- [3] 赵凌燕.人体步态模型实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
ZHAO Ling-yan. The Experiment Study on Human Gait Model[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [4] 亚里士多德.物理学[M].张竹明,译.北京:商务印书馆,1982.
ARISTOTÉLÈS. Physics[M]. ZHANG Zu-ming, Translated. Beijing: The Commercial Press, 1982.
- [5] 张静茹.人类行走步态模型及特征提取方法研究[D].上海:上海大学,2007.
ZHANG Jing-ru. Research on Human Walking Gait Model and Feature Extraction Method[D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.
- [6] 钱竞光,宋雅伟,叶强,等.步行动作的生物力学原理及其步态分析[J].南京体育学院学报(自然科学版),2006,5(4):1-7.
QING Jing-guang, SONG Ya-wei, YE Qiang, et al. The Biomechanics Principle of Walking and Analysis on Gaits[J]. Journal of Nanjing Institute of Physical Education (Natural Science), 2006, 5(4): 1-7.
- [7] 李凯.正常青年人行走步态的下肢关节动力学研究[D].大连:大连理工大学,2009.
LI Kai. Kinetic Analysis of the Lower Limbs in the Walking of Normal Young Adults[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [8] 汤荣光,戴克戎.平地行走中膝关节力的二维分析[J].中国生物医学工程学报,1983,2(3):161-169.
TANG Rong-guang, DAI Ke-rong. two-Dimensional Analysis of Forces Transmitted by Knee Joint in Level Walking[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 1983, 2(3): 161-169.
- [9] BORDEAUX E F J. Interference in Various Gaits and some Suggested Remedies[J]. The Veterinary Journal, 1916, 72: 1-7.
- [10] 戴克戎,汤荣光.平地常速行走时的步态观察[J].中国生物医学工程学报,1982(1):15-21.
DAI Ke-rong, TANG Rong-guang. Study of Gait Patterns of Normal Adults During Level Walking[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 1982(1): 15-21.
- [11] 楼鸿棣,邹慧君,吕恬生.人体水平步行步态的实验和分析[J].上海交通大学学报,1983,17(1):103-116.
LOU Hong-di, ZOU Hui-jun, LÜ Tian-sheng. An Experiment of Human Gait in Level Walking and Its Analysis[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1983, 17(1): 103-116.
- [12] 付艳,余进轩,刘世平,等. Kinect在肢残者运动姿态识别中的应用及有效性研究[J].中国康复医学杂志,2017,32(2):202-206.
FU Yan, YU Jin-xuan, LIU Shi-ping, et al. Application and Effectiveness of Kinect in Motion Posture Recognition of Limb Disabled[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2017, 32(2): 202-206.
- [13] CHEN Fang, CUI Xi-wen, ZHAO Zhe, et al. Gait Acquisition and Analysis System for Osteoarthritis Based on Hybrid Prediction Model[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2020, 85: 101782.
- [14] FIKER R, KIM L H, MOLINA L A, et al. Visual Gait Lab: A User-Friendly Approach to Gait Analysis[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2020, 341: 108775.
- [15] HAZRA S, PRATAP A A, TRIPATHY D, et al. Novel Data Fusion Strategy for Human Gait Analysis Using Multiple Kinect Sensors[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2021, 67(1): 102512.
- [16] PINTO R F, BIRMINGHAM T B, LEITCH K M, et al. Reliability and Validity of Knee Angles and Moments in Patients with Osteoarthritis Using a Treadmill-Based Gait Analysis System[J]. Gait & Posture, 2020, 80: 155-161.
- [17] 邵洋洋,张峻霞,姜美姣,等.青年男性佩戴护膝跑步优势侧和非优势侧下肢关节的运动学特征[J].中国组织工程研究,2022,26(6):832-837.

- SHAO Yang-yang, ZHANG Jun-xia, JIANG Mei-jiao, et al. Kinematics Characteristics of Lower Limb Joints of Young Men Running Wearing Knee Pads[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2022, 26(6): 832-837.
- [18] 耿艳利. 下肢运动模式识别及动力型假肢膝关节控制方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- GENG Yan-li. Motion Pattern Recognition and Control of Active Knee Prosthesis[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [19] ZHANG Peng, ZHANG Jun-xia, ZHANG Zun-hao. Design of RBFNN-Based Adaptive Sliding Mode Control Strategy for Active Rehabilitation Robot[J]. IEEE Access, 2020(8): 155538-155547.
- [20] ZHANG Peng, ZHANG Jun-xia. Deep Learning Analysis Based on Multi-Sensor Fusion Data for Hemiplegia Rehabilitation Training System for Stoke Patients[J]. Robotica, 2022, 40(3): 780-797.
- [21] 赵焱飞, 张悦宸. 基于 Vicon 运动捕捉系统的无人机气动特性分析[J]. 飞行力学, 2020, 38(4): 11-15.
- ZHAO Yi-fei, ZHANG Yue-chen. Aerodynamic Characteristics Analysis of UAV Based on Vicon Motion Capture System[J]. Flight Dynamics, 2020, 38(4): 11-15.
- [22] 赵文平. 基于数据的高质量三维人手运动的建模、生成与控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- ZHAO Wen-ping. Data-Driven Researches on 3D High-Fidelity Hand Motion Modeling, Generation and Control[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [23] 张峻霞, 蔡运红, 刘琪. 穿戴式下肢外骨骼对人体步态特性的影响研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(5): 785-794.
- ZHANG Jun-xia, CAI Yun-hong, LIU Qi. Study on the Influence of Wearable Lower Limb Exoskeleton on Gait Characteristics[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2019, 36(5): 785-794.
- [24] 成方敏, 张峻霞, 苏海龙, 等. 弯道行走地面支反力与利用摩擦系数的研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2017, 34(1): 53-56.
- CHENG Fang-min, ZHANG Jun-xia, SU Hai-long, et al. Research on Ground Reaction Forces and Utilized Coefficient of Friction of Turning Gait[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2017, 34(1): 53-56.
- [25] 李洋. 结构环境下步态失稳反应机理研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- LI Yang. Study on the Reaction Mechanism of Gait Instability in Structural Environment[D]. Tianjing: Tianjin University of Science and Technology, 2016.
- [26] ZHANG Peng, ZHANG Jun-xia, ELSABBAGH A. Lower Limb Motion Intention Recognition Based on sEMG Fusion Features[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 7005-7014.
- [27] 裴鹏. 足底压力形成与人体多影响因素关系机理及测量系统研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
- PEI Peng. Study on Relationship between Plantar Pressure Formation with Body Multi-Influencing Factors and Measurement System[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [28] 张峻霞, 张子倩, 邵洋洋, 等. 基于运动生物力学的护膝设计评价[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 1-7.
- ZHANG Jun-xia, ZHANG Zi-qian, SHAO Yang-yang, et al. Evaluation of Kneepad Design Based on Sports Biomechanics[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(24): 1-7.
- [29] 杨阳, 蒲放, 钱雅君, 等. 日常运动时足底压力实时检测方法研究[J]. 医用生物力学, 2011, 26(4): 299-304.
- YANG Yang, PU Fang, QIAN Ya-jun, et al. Real-Time Plantar Pressure Measurement for Monitoring Exercise Load in Daily Life Activities[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2011, 26(4): 299-304.
- [30] 张清悦, 钱竞光. 偏瘫步态分析与仿真研究进展[J]. 力学与实践, 2021, 43(3): 327-334.
- ZHANG Qing-yue, QIAN Jing-guang. Progress of Analysis and Simulation of Hemiplegic Gait[J]. Mechanics in Engineering, 2021, 43(3): 327-334.
- [31] 施宝兴, 魏文仪. 逆向动力学计算方法及提高计算精度的探讨[J]. 南京体育学院学报(自然科学版), 2003, 2(2): 6-12.
- SHI Bao-xing, WEI Wen-yi. The Inverse Dynamic Method and Promoting Its Precision of Calculation[J]. Journal of Nanjing Institute of Physical Education (Natural Science), 2003, 2(2): 6-12.
- [32] RASMUSSEN J, DAMSGAARD M, SURMA E, et al. AnyBody - a Software System for Ergonomic Optimization[M]. Aalborg: AnyBody Technology, 2003.
- [33] ANDERSEN M, YANG Jian, ZEE M D, et al. Full-Body Musculoskeletal Modeling Using Dual Microsoft Kinect Sensors and the AnyBody Modeling System[C]. Natal: Aalborg University, 2013.
- [34] DAMSGAARD M, RASMUSSEN J, CHRISTENSEN S T, et al. Analysis of Musculoskeletal Systems in the AnyBody Modeling System[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006, 14(8): 1100-1111.
- [35] 刘书朋, 司文, 严壮志, 等. 基于 AnyBody™ 技术的人体运动建模方法[J]. 生物医学工程学进展, 2010, 31(3): 131-134.
- LIU Shu-peng, SI Wen, YAN Zhuang-zhi, et al. The Human Motions Modeling and Simulation Based on AnyBody Technology[J]. Progress in Biomedical Engineering, 2010, 31(3): 131-134.
- [36] CHANDER D S, CAVATORTA M P. Multi-Directional One-Handed Strength Assessments Using AnyBody Modeling Systems[J]. Applied Ergonomics, 2018, 67(1): 225-236.
- [37] ATICI H, GONEN D, ORAL A, et al. Ergonomic Analysis of an Assembly Line Using the AnyBody Modeling System[C]. 城市: 出版单位, 2017.
- [38] 丁晨, 王君泽, 高瞻. 基于 AnyBody 的汽车驾驶中人体腿部逆向动力学仿真[J]. 中国生物医学工程学报, 2013, 32(1): 124-128.

- DING Chen, WANG Jun-ze, GAO Zhan. Inverse Dynamics Simulation of the Musculoskeletal Model of Human Legs in Driving Based on AnyBody Modeling System[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2013, 32(1): 124-128.
- [39] SAVONNET L, DUPREY S, WANG X. Coupling rigid multi-body and deformable finite element human models for assessing seat discomfort[C]. Montreal: DHM, 2016.
- [40] 杨枫, 何智成, 成艾国, 等. 基于生物力学的踏板人机工程设计研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(4): 459-465.
YANG Feng, HE Zhi-cheng, CHENG Ai-guo, et al. A Research on Pedal Ergonomic Design Based on Biomechanics[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(4): 459-465.
- [41] 姜畅. 基于人体生物力学的可调节康复床设计[D]. 天津: 天津大学, 2019.
JIANG Chang. The Design of an Adjustable Rehabilitation Bed Based on Human Biomechanics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [42] 耿治中. 基于 Anybody 仿真的男性足球运动员不同角度侧切动作下肢生物力学特征分析[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2021.
GENG Zhi-zhong. The Biomechanical Characteristics of the Lower Limb of Male Football Player with Different Angles of Cutting were Analyzed Based on anybody Modeling System[D]. Wuhan: Wuhan Sports University, 2021.
- [43] BASSANI T, STUCOVITZ E, QIAN Zhi-hui, et al. Validation of the AnyBody Full Body Musculoskeletal Model in Computing Lumbar Spine Loads at L4/L5 Level[J]. Journal of Biomechanics, 2017, 58(1): 89-96.
- [44] 王星月. 考虑骨肌特性的汽车操纵部件人机交互设计[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WANG Xing-yue. Human-Machine Interaction Design of Vehicle Control Components Considering the Musculoskeletal Characteristics[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [45] 吕国敏. 基于 AnyBody 的汽车驾驶员坐姿力学特性建模及坐姿支撑设计[D]. 济南: 山东大学, 2016.
(LÜ/LV/LU/LYU) G M. Sitting Posture Support Design and Biomechanical Modeling of the Musculoskeletal Model Based on anybody[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [46] 高飞, 项忠霞, 赵明, 等. 基于 Anybody 的自行车骑行运动仿真与试验分析[J]. 机械设计, 2016, 33(1): 105-110.
GAO Fei, XIANG Zhong-xia, ZHAO Ming, et al. Simulation and Testing Analysis of Bicycle Riding Motion Based on anybody[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(1): 105-110.
- [47] 曹宇. 基于人机工程的下肢康复器械设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
CAO Yu. Design and Research of Lower Limb Rehabilitation Products Based on Ergonomics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [48] 赵明. 外骨骼式下肢康复机器人训练过程仿真及其有效性研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
ZHAO Ming. Simulation and Effectiveness Research of the Training Process about the Exoskeleton Lower Limb Rehabilitation Robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [49] BARDIN A L, TANG Li-qiong, PANIZZI L, et al. Development of an anybody Musculoskeletal Model of the Thoroughbred Forelimb[J]. Journal of Equine Veterinary Science, 2021, 103(1): 103666.
- [50] TRINLER U, SCHWAMEDER H, BAKER R, et al. Muscle Force Estimation in Clinical Gait Analysis Using AnyBody and OpenSim[J]. Journal of Biomechanics, 2019, 86(1): 55-63.
- [51] MAHADAS S, MAHADAS K, HUNG G K. Biomechanics of the Golf Swing Using OpenSim[J]. Computers in Biology and Medicine, 2019, 105(1): 39-45.
- [52] 苏阳, 钱竞光. 体操吊环动作的肌电和 LifeMOD 仿真研究[J]. 吉林体育学院学报, 2021, 37(6): 64-74.
SU Yang, QIAN Jing-guang. Myoelectric and LifeMOD Simulation of Gymnastic Ring Movements[J]. Journal of Jilin Sport University, 2021, 37(6): 64-74.
- [53] 薛红军, 郑硕, 铁彦清, 等. 飞行员触点操作能力仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1584-1590.
XUE Hong-jun, ZHENG Shuo, TIE Yan-qing, et al. Simulation for Pointing Manipulation Performance of Pilot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1584-1590.
- [54] 马妮, 肖丽英. 基于 LifeMOD 的个性化人工膝关节设计中的生物力学分析[J]. 中国康复医学杂志, 2011, 26(6): 538-542.
MA Ni, XIAO Li-ying. A Biomechanical Analysis Based on LifeMOD for Individualized Artificial Knee Joint Design[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2011, 26(6): 538-542.
- [55] 戎科, 钱竞光. 运动生物力学仿真建模软件 LifeMOD 和 OpenSim 的建模比较[J]. 南京体育学院学报(自然科学版), 2015, 14(5): 38-42.
RONG Ke, QIAN Jing-guang. Comparison of LifeMOD and Open Sim[J]. Journal of Nanjing Sport Institute (Natural Science), 2015, 14(5): 38-42.
- [56] ALEXANDER N, SCHWAMEDER H, BAKER R, et al. Effect of Different Walking Speeds on Joint and Muscle Force Estimation Using AnyBody and OpenSim[J]. Gait & Posture, 2021, 90(1): 197-203.
- [57] 孟殿怀, 励建安. 临床三维步态分析系统的组成、原理及其临床应用[C]. 南京: 中国针灸学会; 中国康复学会; 中华医学会, 2006.
MENG Dian-huai, LI Jian-an. Composition, principle and clinical application of clinical three-dimensional gait analysis system[C]. Nanjing: China Association of Acupuncture-Moxibustion; Chinese Association of Rehabilitation Medicine; Chinese Medical Association, 2006.
- [58] 刘铭, 李灵晓, 苏玉洁, 等. 步态分析在阿尔茨海默

- 病诊断评估和鉴别中的应用[J]. 中华老年医学杂志, 2021(12): 1489-1492.
- LIU Ming, LI Ling-xiao, SU Yu-jie, et al. Application of Gait Analysis in Evaluation and Diagnostic Differentiation of Alzheimer's Disease[J]. Chinese Journal of Geriatrics, 2021(12): 1489-1492.
- [59] 白森, 郗淑燕. 成人型脊柱畸形患者运动功能的三维步态分析[J]. 首都医科大学学报, 2021(6): 1070-1075.
- BAI Sen, QIE Shu-yan. An Analysis on Three-Dimensional Gait of Patients with Adult Spinal Deformity[J]. Journal of Capital Medical University, 2021(6): 1070-1075.
- [60] O'SULLIVAN R, FRENCH H P, HORGAN F. A Prospective Assessment of the Progression of Flexed-Knee Gait over Repeated Gait Analyses in the Absence of Surgical Intervention in Bilateral Cerebral Palsy[J]. Gait & Posture, 2020, 79(1): 133-138.
- [61] KIM D H, KYEONG S, CHEON M, et al. Characterization of Idiopathic Parkinson's Disease Subgroups Using Quantitative Gait Analysis and Corresponding Subregional Striatal Uptake Visualized Using 18F-FP-CIT Positron Emission Tomography[J]. Gait & Posture, 2020, 82(1): 167-173.
- [62] SHIN K J, KANG J W, SUNG K H, et al. Quantitative Gait and Postural Analyses in Patients with Diabetic Polyneuropathy[J]. Journal of Diabetes and Its Complications, 2021, 35(4): 107857.
- [63] TSUCHIYA A, TERAYAMA K, SAKAKIBARA R, et al. Urodynamic and Gait Analyses in Multiple System Atrophy[J]. Journal of the Neurological Sciences, 2020, 411(1): 116676.
- [64] SYCZEWSKA M, ŚWIECICKA A, SZCZERBIK E, et al. Types of Gait Deviations in Children and Adolescents with Guillain-Barre Syndrome Identified Using Cluster Analysis[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2021, 66(1): 102496.
- [65] 单莎瑞, 黄旭明, 张明兴, 等. 三维步态分析低频重复经颅磁刺激治疗脑卒中后偏瘫的步态变化[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(5): 762-767.
- SHAN Sha-rui, HUANG Xu-ming, ZHANG Ming-xing, et al. Three-Dimensional Gait Analysis of Low-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Post-Stroke Hemiplegia[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2022, 26(5): 762-767.
- [66] 潘浩, 赵慧慧, 王江静, 等. 运动学对线与机械力学对线指导全膝关节置换后步态分析的比较[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(3): 365-370.
- PAN Hao, ZHAO Hui-hui, WANG Jiang-jing, et al. Comparison of Kinematic Alignment and Mechanical Alignment to Guide Gait after Total Knee Arthroplasty[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2022, 26(3): 365-370.
- [67] LAMAS V, GUEUGNON M, FOURNEL I, et al. Dynamic Global Sagittal Alignment in Patients with Lumbar Spinal Stenosis: Analysis of the Effects of Decompression Surgery on Gait Adaptations[J]. Gait & Posture, 2021, 88(1): 272-279.
- [68] ROSTEIUS T, JETTKANT B, BRINKEMPER A, et al. Long-Term Follow up of Extensor Tendon Ruptures of the Knee Using Electromyography and Three-Dimensional Gait Analysis[J]. The Knee, 2021, 29(1): 251-261.
- [69] 周萌, 黄强, 蒋协远, 等. 步态分析在骨科与物理康复领域的应用进展[J]. 骨科临床与研究杂志, 2021, 6(4): 243-249.
- ZHOU Meng, HUANG Qiang, JIANG Xie-yuan, et al. Application Progress of Gait Analysis in Orthopedics and Physical Rehabilitation[J]. Journal of Clinical Orthopedics and Research, 2021, 6(4): 243-249.
- [70] 张晶晶, 李艳. 脑卒中偏瘫步态特点及康复策略[J]. 中国老年学杂志, 2019, 39(5): 1044-1047.
- ZHANG Jing-jing, LI Yan. Gait Characteristics and Rehabilitation Strategies of Stroke Hemiplegia[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2019, 39(5): 1044-1047.
- [71] 殷可意. 老年女性膝关节关节炎患者步态适应性运动特征研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2021.
- YIN Ke-yi. Adaptive Motion Features in Older Women with Knee Osteoarthritis during Walking[D]. Shanghai: Shanghai University of Sport, 2021.
- [72] MARTINEZ L, NOÉ N, BELDAME J, et al. Quantitative Gait Analysis after Total Hip Arthroplasty through a Minimally Invasive Direct Anterior Approach: A Case Control Study[J]. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research, 2022(1): 103214.
- [73] BLASIIS P D, SIANI M F, FULLIN A, et al. Short and Long Term Effects of Nabiximols on Balance and Walking Assessed by 3D-Gait Analysis in People with Multiple Sclerosis and Spasticity[J]. Multiple Sclerosis and Related Disorders, 2021, 51(1): 102805.
- [74] HOFMAN M, KOLEJEWSKA A, GREVEN J, et al. Gait Analysis and Muscle Weight Analysis after Lower Extremity Fractures in a Small Animal Model[J]. Gait & Posture, 2020, 77(1): 207-213.
- [75] WU L M, WANG J K, LIU J, et al. Gait Analysis Combined with the Expression of Tgf- β 1, Tgf- β 3 and Creb During Achilles Tendon Healing in Rat[J]. Chinese Journal of Traumatology, 2021, 24(6): 8.
- [76] ZHAO Rui-peng, DONG Zheng-quan, WEI Xiao-chun, et al. Inflammatory Factors are Crucial for the Pathogenesis of Post-Traumatic Osteoarthritis Confirmed by a Novel Porcine Model: "Idealized" Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Gait Analysis[J]. International Immunopharmacology, 2021, 99(1): 107905.
- [77] 顾琳燕. 基于步态分析的运动康复评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- GU Lin-yan. Gait Analysis Based Assessment of Motion Rehabilitation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [78] FLUX E, VAN DER KROGT M M, CAPPAP, et al. The Human Body Model Versus Conventional Gait Models for Kinematic Gait Analysis in Children with Cerebral Palsy[J]. Human Movement Science, 2020, 70(1): 102585.
- [79] DONISI L, PAGANO G, CESARELLI G, et al. Bench-

- marking between Two Wearable Inertial Systems for Gait Analysis Based on a Different Sensor Placement Using Several Statistical Approaches[J]. *Measurement*, 2021, 173(1): 108642.
- [80] OTA M, TATEUCHI H, HASHIGUCHI T, et al. Verification of Validity of Gait Analysis Systems during Treadmill Walking and Running Using Human Pose Tracking Algorithm[J]. *Gait & Posture*, 2021, 85(1): 290-297.
- [81] MA Rui, ZHAO H, WEI Wei, et al. Gait Characteristics under Single-/Dual-Task Walking Conditions in Elderly Patients with Cerebral Small Vessel Disease: Analysis of Gait Variability, Gait Asymmetry and Bilateral Coordination of Gait[J]. *Gait & Posture*, 2022, 92(1): 65-70.
- [82] 陈一, 施海涛, 毛岭. 脑卒中患者步态周期各时相中下肢肌肉的表面肌电特点[J]. *中国康复理论与实践*, 2019, 25(8): 956-961.
- CHEN Yi, SHI Hai-tao, MAO Ling. Surface Electromyographic Features of Lower Limb Muscles during Different Phases of Gait Cycle in Stroke Patients[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2019, 25(8): 956-961.
- [83] 王海虎, 王青云, 赵振. 带膝关节非对称被动行走器的步态动力学建模与分析[C]. 北京: 北京力学学会, 2019.
- WANG Hai-hu, WANG Qing-yun, ZHAO Zhen. Modeling and Analysis of Gait Dynamics for Asymmetric Passive Walkers with Knee Joints[C]. Beijing: BSTAM, 2019.
- [84] 高亮. 基于外骨骼的下肢康复机器人结构设计与研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- GAO Liang. Structural Design and Research of Lower Limb Rehabilitation Robot Based on Exoskeleton[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2019.
- [85] 谢峥, 王明江, 黄武龙, 等. 基于实时步态分析的行走辅助外骨骼机器人系统[J]. *生物医学工程学杂志*, 2017, 34(2): 265-270.
- XIE Zheng, WANG Ming-jiang, HUANG Wu-long, et al. Exoskeleton Robot System Based on Real-Time Gait Analysis for Walking Assist[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2017, 34(2): 265-270.
- [86] 徐兆红, 宋成利, 喻洪流, 等. 踝关节可左右摆动的康复器具设计[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2011, 15(39): 7292-7294.
- XU Zhao-hong, SONG Cheng-li, YU Hong-liu, et al. Design of an Ankle Rehabilitation Device[J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2011, 15(39): 7292-7294.
- [87] SOMMER B, HOLLENSTEIN A, GRAF E. Stability Boots for the Treatment of Achilles Tendon Injuries: Gait Analysis of Healthy Participants[J]. *Gait & Posture*, 2022, 91(1): 131-136.
- [88] 周海. 国人髋关节解剖与行为学特性研究及在人工关节设计中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- ZHOU Hai. The Kinematics and Anatomy Research on the Hip of Chinese People and the Application in Designing of Artificial Hip Joint[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [89] LULLINI G, CARAVAGGI P, LEARDINI A, et al. Retrospective Comparison Between a Two- and Three-Component Ankle Arthroplasty: Clinical and Functional Evaluation via Gait Analysis[J]. *Clinical Biomechanics*, 2020, 80(1): 105180.
- [90] PELLEGRINO P, CONTI A, PAUTASSO A, et al. Gait Analysis: Comparative Evaluation of Conventional Total Knee Replacement and Modular Distal Femoral Megaprosthesis[J]. *The Knee*, 2020, 27(5): 1567-1576.
- [91] DOMMERSHUIJSEN L J, RAGUNATHAN J, RUITER R, et al. Gait Speed Reference Values in Community-Dwelling Older Adults-Cross-Sectional Analysis from the Rotterdam Study[J]. *Experimental Gerontology*, 2022, 158(1): 111646.
- [92] UNGER E W, HISTING T, ROLLMANN M F, et al. Development of a Dynamic Fall Risk Profile in Elderly Nursing Home Residents: A Free Field Gait Analysis Based Study[J]. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 2021, 93(1): 104294.
- [93] 陈平波. 大负荷训练对武术运动员步态影响的研究[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2007.
- CHEN Ping-bo. The Research of Heavy Load Training on the Gait Influence of the Wu Shu Athletes[D]. Wuhan: Wuhan Sports University, 2007.
- [94] 高涵. 篮球运动员步态与运动损伤关系研究——以广州体育学院运训篮球班为例[D]. 广州: 广州体育学院, 2020.
- GAO Han. The Research on Relationship between Gait and Injury of Professional Basketball Players in Sports Training: Take Guangzhou Institute of Physical Education as an Example[D]. Guangzhou: Guangzhou Sport University, 2020.
- [95] RAGHU S L, CONNERS R T, KANG C K, et al. Kinematic Analysis of Gait in an Underwater Treadmill Using Land-Based Vicon T 40s Motion Capture Cameras Arranged Externally[J]. *Journal of Biomechanics*, 2021, 124(1): 110553.
- [96] RAGHU S L, KANG C K, WHITEHEAD P, et al. Static Accuracy Analysis of Vicon T40s Motion Capture Cameras Arranged Externally for Motion Capture in Constrained Aquatic Environments[J]. *Journal of Biomechanics*, 2019, 89(1): 139-142.

责任编辑: 陈作