

偏瘫步态分析与仿真研究进展¹⁾

张清悦²⁾ 钱竞光³⁾

(南京体育学院, 南京 210014)



钱竞光, 男, 二级教授、博士生导师, 中国体育科学学会第五届理事会理事, 运动生物力学分会常委。国家自然科学基金委员会评审专家, 教育部“长江学者”评审专家, 教育部重点学科、精品课程、教学团队评审专家, 教育部博士、硕士研究生学位论文抽检评审专家。主持完成国家自然科学基金项目、国家科技支撑计划(子课题)和省部级课题十多项。发表学术论文 100 多篇。主持全运会、奥运会江苏体操、跳水、蹦床等项目科技攻关, 成效显著, 被省政府授记二等功两次、三等功一次。获得国际青年学者奖和省部级科技二等奖 5 项, 获得国家专利 12 项, 其中发明专利 5 项。创立运动康复生物力学课程, 获得江苏省教学成果一等奖、国家体育总局教学成果二等奖, 课程团队获评江苏省优秀教学团队, 其编著的课程教材为江苏省评优精品教材。创立人体运动动作技术与诊断课程, 获江苏省研究生优秀课程奖, 出版的专著为“十三五”江苏省高校重点教材。2020 年因出版专著《人体运动动作的动力学模拟和仿真》, 所在团队获江苏省“十佳研究生导师团队”提名奖。

摘要 步行是运动的动作基础, 对异常步态进行生物力学研究能够有效提高相关患者的诊疗和康复效果。根据现有文献资料, 以偏瘫步态为例探讨步态分析的研究进展: 从应用影像解析进行运动学定量研究, 到应用肌电、测力台和逆向动力学进行动力学定量研究, 再发展到运用动力学建模仿真对步行下肢肌力的定量研究, 揭示人体动力学与骨骼有限元耦联建模的研究新动向, 并提出异常步态动力学数据常模研究的重要性与不足。

关键词 步态分析, 生物力学, 仿真模拟

中图分类号: G806.4 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-20-168

PROGRESS OF ANALYSIS AND SIMULATION OF HEMIPLEGIC GAIT¹⁾

ZHANG Qingyue²⁾ QIAN Jingguang³⁾

(Nanjing Sport Institute, Nanjing 210014, China)

Abstract Walking is the basic movement, and the biomechanical study of the abnormal gait can effectively help the diagnosis, treatment and rehabilitation of related patients. Based on the current literature, the hemiplegic gait is taken as an example to discuss the research progress of the gait analysis: the new trends of research on the coupling modeling of the human body dynamics and the bone finite element include the application of the image analysis to the quantitative study of kinematics, the application of the electromyogram, the dynamometer and the reverse dynamics to the quantitative study of dynamics, as well as the quantitative study of the lower limb muscle strength by dynamic modeling and simulation. The research of the norm of the abnormal gait dynamic data is especially discussed.

Key words gait analysis, biomechanics, simulation

2020-04-28 收到第 1 稿, 2020-07-27 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金资助项目 (31270998)。

2) 张清悦, 硕士研究生, 主要研究方向为步态生物力学。E-mail: 1105950206@qq.com

3) 通讯作者。E-mail: 2867996025@qq.com

引用格式: 张清悦, 钱竞光. 偏瘫步态分析与仿真研究进展. 力学与实践, 2021, 43(3): 327-334

Zhang Qingyue, Qian Jingguang. Progress of analysis and simulation of hemiplegic gait. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(3): 327-334

行走是完成绝大部分运动的动作基础。步态的特异性要求在步态分析中利用力学原理、研究方法,结合个人解剖学及运动学特征对人体行走功能进行综合研究^[1]。

异常步态是脑卒中患者的主要功能障碍之一,也是影响患者日常生活活动、降低生活质量的最主要原因^[2-3]。文献^[4]表明,在急性期存活下来的患者中有20%~30%的人无法行走,其他大部分则伴有中到重度的行走障碍,行走障碍的恢复通常只发生在脑卒中后的六个月内^[5],及时且科学地进行后续康复治疗十分重要。根据步态分析对行走功能异常提出针对性的治疗方案,运用步态分析数据曲线评定肢体运动障碍的程度,可为后续制定康复计划提供数据化参考,对患者康复治疗意义重大。如今对步态的研究缺乏样本量分析,对于痉挛型偏瘫步态的康复而言,构建脑卒中后痉挛步态的动力学常模,对分析其肌张力特征、为临床功能康复提供一定的比较标准具有重要意义。

对步行的观察研究表明,维持步行中的协调看似很简单,但对个体肌肉是如何满足运动的力学机制仍然存在争议^[6]。当代步态分析大多依赖于计算机技术,动力学的三维测力台、多种建模软件,生理学的表面肌电采集分析系统以及运动学的 Vicon 三维运动捕捉系统,均广泛用于临床康复医学、动作技术分析等领域。本文就国内外生物力学技术应用于步态分析,包括偏瘫步态分析的研究进展情况进行综述。

1 步行的解剖学基础及动力学特征

1.1 下肢关节解剖学及力学特征

下肢关节包括髋、膝、踝三个主要关节,相互协调完成步行动作。髋关节位于人体躯干与下肢交界,由髋臼和股骨头组成,是典型的球窝状关节。髋关节传递上肢力量至双下肢,对于人体的坐、走、卧都发挥着非常重要的功能。膝关节是人体中最大、构造最复杂的关节。膝关节结构和功能的复杂性决定了它受力的复杂性,膝关节受到的力主要来自于体重、膝关节肌力以及产生、加速人体运动所需要的力^[7]。膝关节的负荷随人体运动和步态方式变化显著,承载的压力沿半月板和关节软骨向下传导,由于不恰当的运动方式或姿势,年轻人膝关节损伤案例中半月板损伤最为常见。

踝关节位于人体下肢最远端,是人体中距离地面最近的负重关节,由于踝关节解剖结构和位置的特殊性,它是最先进行旋转、前屈等关节活动的关节结构,也是下肢三大关节中最容易发生扭伤的关节。

1.2 步行运动相关的主要肌肉

步行需要多个关节肌肉协调运动,正常的步态离不开肌肉间的良好协调^[8]。一个步态周期中,摆动相需要髋膝关节屈曲、踝关节伸展,最后膝背屈来完成;在支撑相内髋膝关节的适度伸展,有支撑体重的作用^[9]。因此,在大腿肌群中参与步行的主要肌肉有股直肌(使髋关节屈曲),股内、外侧肌(使膝关节伸展),股后肌群中的半腱肌和股二头肌(主要参与屈膝伸髋运动^[10])。而在小腿肌群中,胫骨前肌、腓肠肌内侧头和腓肠肌外侧头分别起到稳定踝关节、协助身体向前运动,引起踝跖屈的作用。另外,小腿肌群中比目鱼肌主要维持站立行走时踝关节的稳定性,并在跖屈运动中起协同作用^[11]。

2 脑卒中患者异常步态表现

上运动神经元损伤可引起肌肉张力的改变,根据损伤部位和程度的不同,肌张力变化性质和幅度也不同。脑卒中患者由于患侧肌力下降、肌张力增高和关节挛缩等病理因素,外加下肢联合反应及共同运动模式^[12]分离运动不充分,致支撑期因患侧髋关节伸展不充分,膝关节僵直、踝背伸受限。患者由于生理功能的变化,会出现步行能力低下,行走时的足底受力也会发生受力不均的情况^[13]。

2.1 肌痉挛步态

据研究统计,脑卒中后痉挛发生率为17%~46%^[14],痉挛表现出的运动障碍特征主要为速度依赖性的紧张性拉伸反射增高,由过度兴奋的拉伸反射引起的肌腱痉挛是上运动神经元综合征的一个典型表现^[15]。脑卒中后身体进入痉挛状态,出现运动失控、疼痛痉挛、姿势异常、肌肉紧张度增加和步行功能减退的情况。痉挛型脑瘫关节伸展的病理阻力机制尚不清楚,一般归因于痉挛肌肉的被动和主动特性,即使没有任何主动动力施加的情况下,关节运动的范围也是有限的,因此可合理预测痉挛肌肉的被动力量处于很高的水平^[16]。脑卒中后小腿三头肌痉挛是影响患者正常行走的重要因素之一,小腿三头肌痉挛常导致步行中患侧足下垂,无法或不能充

分踝背屈, 随之发生站立相膝过伸、支撑相明显缩短、摆动相足尖下垂、髌关节外展代偿、步幅减小和步态严重不对称等情况^[17], 影响患者的平衡和行走安全。目前对于脑卒中后肌痉挛的主要治疗方法有中医治疗、药物治疗与物理治疗等^[18]。肌张力是维持人体正常站立和转移的基础, 在脑卒中后肌痉挛的治疗中, 不应一味追求降低肌张力。

2.2 肌无力步态

脑卒中患者因神经系统的损伤引发下肢肌无力, 同时由于病程和卧床时间的增加导致活动大幅度减少而加重下肢肌无力的程度, 严重影响正常行走能力。由于脑卒中后中枢神经系统病变, 患者无法或较难募集运动单位, 导致肌肉自主收缩困难, 影响肌肉力量的产生与肢体的协调运动^[19]。在因神经肌肉疾病导致的小腿肌无力患者群体中, 步行常受到站立时的踝关节背屈和膝关节屈曲过度以及踝关节蹬离减少的阻碍^[20]。步态主要表现为患侧足下垂、内翻, 膝反张, 呈现拖曳步态或划圈步态^[21], 特点在于步态不对称性、耗能增加、稳定性下降以及患侧下肢单支撑相显著缩短, 双支撑相延长, 步宽加大, 步长步幅缩短, 步频步速降低等^[22-23]。

3 生物力学步态分析方法研究进展

3.1 运动学、动力学数据采集

现阶段生物力学研究多采用 Vicon 三维运动捕捉系统及测力台来采集人体运动过程中运动学与动力学数据, Vicon 三维运动捕捉系统是目前最受国际公认的影像采集分析系统。黄萍等^[24]运用 Vicon 对 100 名正常青年进行步态测试, 得到时空、运动学及动力学参数, 并建立正常人的步态数据模型, 对受试者自然行走时的地面反作用力、时空参数特征及髌、膝、踝关节屈伸角度变化特征进行分析, 获得正常青年自然行走的运动学特征, 为临床上异常步态的研究提供对比参考。

三维步态分析不仅能客观定量评价患者的步态水平, 还可根据结果推测出脑卒中后异常步态的主要问题所在^[25], 如髌膝踝关节控制差、躯干稳定性差、步态不对称或是重心歪斜等。这类研究属于运动学范畴, 局限于运动的表象, 无法探究产生运动的根本原因, 并且缺乏人体行走移动的动力学分析。研究人员在进行下肢运动或步态相关的生物力学分析时,

多采用 Vicon 与三维测力台组合测试的方法。Vicon 系统用于收集受试者指定运动中的运动学数据, 测力台用于收集受试者运动中的地面反作用力。通过测力台获得步行中常人和患者的地面反作用力、加速度曲线和站立时压力中心曲线^[12], 了解患者的足底受力情况, 解释步态异常的原因, 为运动障碍患者的步态治疗和康复提供临床指导意见。

影像解析法作为运动学方向的定量研究, 其与测力台测得的数据并非囊括所有肌肉参数, 尚不能全面分析异常步态的产生原因。因此在后续研究中可借助表面肌电信号来分析, 并借助一些计算机建模软件来进行更深层次的步态研究。

3.2 表面肌电信号分析

表面肌电图是神经肌肉系统活动时产生的运动单元动作电位在时间和空间上的叠加, 反映神经、肌肉的功能状态, 具有无创性、实时性、多靶点测量等优点, 可用于动力学定性、定量分析各种运动状态下的神经肌肉活动情况, 广泛用于基础医学研究、临床诊断和康复工程^[26-27], 对于正常人或疾病患者的特定肌肉功能评定、辅助电针疗法治疗颈椎病^[28]、监测运动过程中肌肉收缩情况和辅助步态分析^[29] 有重要意义。

Kirker^[30] 记录了 17 名脑卒中偏瘫患者步行中髌关节外展肌与内收肌的肌电活动振幅, 并与 16 名正常对照组进行对比研究。发现在步行起始阶段人体重心发生转移时, 患者的患侧肌肉肌电活动较对照组振幅下降, 但其激活模式所表现出的肌电特征与正常对照组基本相似。表面肌电图反映骨骼肌的激活程度, 可以确定骨骼肌电信号与肌力有高度的相关性。然而利用肌电图预测肌肉力的最大缺点在于肌肉产生的力不能被直接测量, 肌力的间接测量与皮肤表面状态或其他设备的电信号有关, 这些因素虽不影响肌电信号, 但会影响到测得的肌力值^[31]。

3.3 逆向动力学分析方法

逆向动力学是指定物体某一运动, 利用力学规律求解使物体发生变化的运动表达的一种研究方法。在人体中, 逆向动力学就是根据各种运动学数据, 推算人体各关节的肌肉力矩或运动系统内外的约束力^[32]。

在步态分析领域, Zajac 等^[33] 使用由净关节力矩驱动的动力学模型为健康和病理步态的对比分析

提供了思路,通过对其他步行模拟的研究,来揭示单个肌肉作用于步行支撑相和摆动相的力学机制。徐欢欢等^[34]基于 Anybody 软件建立包含肌肉骨骼系统的下肢三维模型,采用逆向动力学在下肢关节处设置模型驱动点,分析正常步态中踝关节与膝关节角度、关节力矩的变化规律,并探讨肌力与肌肉活性之间的关联。以逆向动力学为基础的仿真方法的实质是已知运动的约束条件与时间序列,建立动力学方程,求解各关节的力与力矩^[35]。日本学者 Kamono 等^[36]运用逆向动力学对偏瘫患者康复前后拄拐行走时的下肢力矩进行对比分析,同时分别对地面对拐杖与下肢的反作用力进行分析研究。结果表明随着步行速度的提高,患侧下肢髋关节外展、外旋及膝关节伸展力矩较康复治疗前均增大,健侧髋关节外展力矩减小、外旋力矩增大。此研究方法能够定量地测定人体运动时关节力矩和地面反作用力的变化规律,分析主要肌群的用力规律并确定它们的工作性质,获得运动中工作肌群的专项生物力学特征,以对各关节肌群的用力大小、收缩性质和时序性做出分析^[31]。

随着肌电、三维测力台和逆向动力学研究的发展,对步态的解析已从原先的运动学定量转变到以动力学定量为主,逐步从观察步态的表象发展到探究影响步态的力学机制,运动学辅助动力学定量分析已成为步态研究的主流。以逆向动力学为理论基础的力学分析软件也被广泛运用,常见的有 Lifemod 与 Opensim 建模软件。

3.3.1 Lifemod 仿真与模拟

对步态动力学的分析可以获得步行的生物力学特征,从异常步态模式中对对比辨别出患者步态障碍的外在表现^[37]。运动生物力学将人体简化成由不同刚体节段组合成的联接体,多体系统动力学理论的不断发展为复杂系统的结构设计、分析以及优化提供了有力支持^[38],也为体育运动技术的研究开辟了新途径。

Lifemod 是在 Adams 系统基础上开发出的一种专门用于人体动力学分析的软件,所建立的模型可以与 ADAMS 的任何机械系统进行耦合分析,通过模拟准确得到人体在工作状况下的运动状态和内部受力情况^[39]。冯雷^[40]运用 Lifemod 软件构建正常青年男性步行的下肢动力学常模,通过实验获得肌

力与关节运动之间的对应关系,解释步行过程中下肢肌肉协同控制腿部动作的动力学规律,用作偏瘫步态仿真研究的参照。束一铭等^[41]从关节活动度与地面反作用力方面对 Lifemod 动力学模型作了有效性验证,对常人和偏瘫患者步态进行运动学与动力学分析,结果表明肌力的大小影响关节屈曲度,而各关节的异常活动会影响到步态。在后续研究中构建一定样本量的脑卒中后偏瘫步态的动力学常模,可为偏瘫行走康复标准化提供参考。

Lifemod 也用于分析人体特定关节在运动中的力学机制。建立常人和膝关节置换术者步行的运动学与动力学模型,以整个步态周期中膝关节的关节接触力、屈伸角度以及肌肉载荷曲线等参数,来检验所植入的个性化人工膝关节与个体力学的吻合度^[39]。

Lifemod 一般和 Vicon 或 Motion Analyse 运动捕捉系统共同使用,收集受试者指定运动过程中肢体的运动学数据,根据实验对象的身体节段参数在 Lifemod 中建立步态多体动力学模型,通过仿真结果的处理和分析模拟计算出关节力及周围相关肌肉力值。文献 [42] 利用功能电刺激偏瘫患肢股前肌和股直肌,并用 Lifemod 肌骨建模探讨功能电刺激对踝、膝关节矢状面运动学和相关偏瘫步态肌肉力量的急性影响。研究发现刺激期间患肢踝关节最大背屈角和膝关节屈曲角明显增加,刺激后受体肌肉肌力显著增加。将肌骨模型纳入功能电刺激期间或之后偏瘫患者步态中的肌力评估,对改善异常步态有一定辅助作用。

Lifemod 的局限性在于只能模拟刚体之间(人体与刚体)的接触,因此人体的质量分布、刚体系数等参量对实验结果有很大影响^[43],但只要模型模拟准确,Lifemod 可直接解析出人体肌力。

3.3.2 Opensim 建模

在生物力学分析中另一代表性的仿真工具是 Opensim,由斯坦福大学基于 C++ 和 Java 语言开发的用于建立肌肉模型、仿真与分析的开放性软件。相比于 Lifemod,Opensim 更加包容,允许研究者自行建立原始模型。两款建模软件相同之处在于都要高精度三维影像解析,采集的运动学数据精确度将直接影响到最后结果。

不同的建模方法导出的模型也不同,但其差异还缺乏充分的验证。Trinler 等^[44]利用 Opensim 与

Anybody 软件对脑卒中后临床步态进行对比分析, 通过实验数据理解不同步态之间的变化和差异, 得出两种建模方法 (如肌肉骨骼模型、比例、计算方法) 虽不同, 但得出的肌肉力量在波动模式上仍非常相似。

3.4 有限元分析

3.4.1 有限元建模分析

有限元分析是基于医学计算机断层扫描成像和核磁共振成像技术的一种生物力学研究方法, 通过两种成像途径获得特定部位的清晰影像, 运用 Mimics, Geomagic Studio 等软件建立三维模型来对人体进行生物力学分析^[45-46]。此方法有助于了解颈椎、腰椎间盘突出、关节软骨等骨连结的生物力学特性, 也有助于评价人工关节的安全性和有效性。随着计算机科学的发展和有限元分析软件的改进, 基于有限元的生物力学研究方法成为近年来分析体内或体外骨、关节状态的热点。

有限元可以对人体指定部位进行精确建模, 并修改模型的不同参数, 如载荷、接触以及材料属性。有限元方法可分析关节应力分布、关节间接触力, 相比较其他建模方法具有高效率、低成本的优势^[47]。卢昌怀等^[48] 基于足三维计算机断层扫描数据, 建立足部距骨三维有限元模型, 对人体正常步态过程中的落地、中立、离地 3 个时相进行有限元分析, 对理解正常步态下距骨的生物力学特性及足踝关节在步态中力的分析有重要意义。王芎斌等^[49] 以三维有限元模型为基础, 结合下肢三维步态数据建立动态有限元模型, 模拟人体在平地行走时下肢随关节角度和地面反作用力变化而出现的膝关节内应力的改变。对膝关节的有限元建模可得到步行中膝关节结构 (如韧带) 的不同应力变化, 包括内、外翻程度, 胫骨的前后推力^[50] 等, 辅助确定骨骼畸形肢体的活动水平和接触面上的相应变化^[51], 明确在肢体负重期间影响接触面关节活动的因素。动力学仿真建模逐步将重心转移到对步行下肢肌力的精细化定量分析上, 对人体运动研究的量化、细致化和综合化已成为现代运动解析发展的新方向。

3.4.2 动力学和骨骼有限元耦联建模分析

人体动力学仿真和人体生物材料有限元耦联建模研究是生物力学建模分析的新方向之一, 还缺乏在偏瘫步态方面的研究。此研究方法将人体动力学

与有限元建模结合起来, 能够对人体不同动作施加于自身组织器官的载荷及其应力分布状态进行精细化定量研究, 揭示运动促进康复的动力学机理, 推进运动处方研究由定性分析向定量分析方向发展。

Qian 等^[52] 首次将人体动力学仿真和股骨有限元耦联建模, 探讨人体不同运动过程中施加于自身股骨颈应力变化的规律。对各种下肢动作如步行、下蹲、单腿站立等进行图像解析与动力学建模, 运用动力学仿真将肌力与重力拟施加于骨骼上, 通过有限元精确计算出骨骼上的载荷与应力。以左侧股骨作为研究对象, 根据载荷和边界条件计算出股骨颈部位的应力, 研究不同动作过程中其变化规律。研究发现, 不同运动对股骨颈部位施加的应力不同, 其中步行和向前弓步走分别对股骨颈部位松质骨和密质骨应力刺激最高, 是提高该区域骨量、预防股骨颈骨折最简单易行的锻炼方法。

这为偏瘫步态的创新研究提供了新思路, 在后续关于病理步态的研究中, 可将动力学仿真与有限元建模耦联起来进行步态模型的建立与分析, 对下肢关节载荷与应力分布状态精细定量研究, 为临床康复提供新参考。

4 结论与展望

步态分析经过近几年的快速发展, 新式分析方法和手段不断出现。从最开始利用单一方法发展到多种分析方法综合应用, 从初步的定性分析到影像解析运动学数据的定量分析、测力台与肌电的动力学数据分析、逆向动力学的关节力定量研究, 再发展到动力学建模与仿真, 实现肌力数据的量化研究。步态分析已经进入到大样本量分析层面, 不仅建立了人体步态运动学常模, 动力学常模也通过研究论证得到。人体步态动力学仿真和生物材料有限元耦联建模研究, 更揭示了运动促进康复的动力学机理, 促进运动处方研究由定性分析向定量分析方向发展。

偏瘫步态的研究从借助肉眼观察的定性分析, 到运动学、动力学的定量分析, 再到动力学建模, 越来越重视下肢肌力的精细化定量分析, 这能为临床诊断、治疗和康复提供更加精确的量化数据依据。国内外已有部分通过建模对偏瘫步态分析的案例, 但运用多体动力学软件建立偏瘫步态动力学模型并模拟计算出相关肌肉力量数据的研究尚不多见^[42]。现有的研究还处于个案分析阶段, 构建大样本量脑卒中

后偏瘫步态的动力学常模,对揭示偏瘫步态的内在力学机制,归纳此类步态生物力学规律,为临床行走功能康复标准化提供参考有重要意义。

参 考 文 献

- 1 周天健. 临床实用步态分析学. 中国康复医学杂志, 1993(6): 279
Zhou Tianjian. Clinical practical gait analysis. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 1993(6): 279 (in Chinese)
- 2 Sharon KO, Sally D, Gayle H, et al. Evidence-based educational guidelines for stroke survivors after discharge home. *Journal of the American Association of Neuroscience Nurses*, 2008, 40(3): 173-191
- 3 Ruth D. Rehabilitation of gait speed after stroke: a critical review of intervention approaches. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2008, 22(6): 649-660
- 4 van de Port IGL, Kwakkel G, van Wijk I, et al. Susceptibility to deterioration of mobility long-term after stroke: a prospective cohort study. *Stroke*, 2006, 37(1): 167-171
- 5 Jrgensen HS, Nakayama H, Raaschou HO, et al. Recovery of walking function in stroke patients: the copenhagen stroke study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1995, 76(1): 27-32
- 6 Felix EZ, Richard RN, Steven AK. Biomechanics and muscle coordination of human walking: part II: lessons from dynamical simulations and clinical implications. *Gait & Posture*, 2003, 17(1): 1-17
- 7 吴海山, 吴宇黎. 人工膝关节外科学. 北京: 人民军医出版社, 2005
Wu Haishan, Wu Yuli. Surgery of Artificial Knee Joint. Beijing: People's Military Medical Publishing House, 2005 (in Chinese)
- 8 Rosa MCN, Marques A, Demain S, et al. Methodologies to assess muscle co-contraction during gait in people with neurological impairment—a systematic literature review. *Journal of Electromyography & Kinesiology*, 2014, 24(2): 179-191
- 9 Yan T, Hui-Chan CWY, Li LSW. Functional electrical stimulation improves motor recovery of the lower extremity and walking ability of subjects with first acute stroke: a randomized placebo-controlled trial. *Stroke*, 2005, 36(1): 80-85
- 10 王欣. 曲径康复训练中的多步态特征分析与重心倾角预测研究. [硕士论文]. 天津: 天津大学, 2014
Wang Xin. Multi-gait feature analysis and CoM inclination angle prediction during rehabilitation training on curve path. [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese)
- 11 Elizabeth CW, Mark GB. A systematic review of mechanisms of gait speed change post-stroke. Part 2: exercise capacity, muscle activation, kinetics, and kinematics. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 2017, 24(5): 394-403
- 12 李爱萍, 胡军, 刘合荣. 基于三维测力台系统的人体步态分析. 微计算机信息, 2010, 26(13): 226-228
Li Aiping, Hu Jun, Liu Herong. Human gait analysis based on three-dimensional force platform system. *Microcomputer Information*, 2010, 26(13): 226-228 (in Chinese)
- 13 柏树令, 应大军. 系统解剖学. 北京: 人民卫生出版社, 2013
Bai Shuling, Ying Dajun. Systematic Anatomy. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013 (in Chinese)
- 14 Zorowitz RD, Gillard PJ, Brainin M. Poststroke spasticity: sequelae and burden on stroke survivors and caregivers. *Neurology*, 2013, 80(3): 45-52
- 15 Sunnerhagen KS, Olver J, Francisco GE. Assessing and treating functional impairment in poststroke spasticity. *Neurology*, 2013, 80(3): 35-44
- 16 Shortland AP, Harris CA, Gough M, et al. Architecture of the medial gastrocnemius in children with spastic diplegia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 2002, 44(3): 158-163
- 17 陈晓伟, 程士欢, 李贺等. A 型肉毒毒素局部注射对脑卒中患者下肢肌痉挛和步行能力的改善作用. 吉林大学学报(医学版), 2016, 42(3): 582-586
Chen Xiaowei, Cheng Shihuan, Li He, et al. Improvement effect of botulinum toxin A injection treatment on spasticity of triceps surae and walking ability of patients with stroke. *Journal of Jilin University (Medical Edition)*, 2016, 42(3): 582-586 (in Chinese)
- 18 梁辉, 卢英, 刘夕霞等. 脑卒中后肌痉挛治疗的研究进展. 中国临床新医学, 2019, 12(11): 1251-1254
Liang Hui, Lu Ying, Liu Xixia, et al. Advances in treatment of muscle spasms after stroke. *Chinese New Clinical Medicine*, 2019, 12(11): 1251-1254 (in Chinese)
- 19 廖麟荣, 廖曼霞. 脑卒中后肌肉特性变化研究进展. 中国康复医学杂志, 2015, 30(3): 306-309
Liao Linrong, Liao Manxia. Research progress on changes of muscle characteristics after stroke. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2015, 30(3): 306-309 (in Chinese)
- 20 Ploeger HE, Waterval NFJ, Nollet F, et al. Stiffness modification of two ankle-foot orthosis types to optimize gait in individuals with non-spastic calf muscle weakness—a proof of concept study. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2019, 12(1): 41
- 21 杨红专. 脑卒中的康复治疗进展. 中外医疗, 2011, 30(2): 182-184
Yang Hongzhan. Progress in rehabilitation treatment of stroke. *Chinese and Foreign Medical Science*, 2011, 30(2): 182-184 (in Chinese)
- 22 Trueblood PR. Partial body weight treadmill training in persons with chronic stroke. *Neuro Rehabilitation*, 2001, 16(3): 141-153
- 23 Den Otter AR, Geurts ACH, Mulder TH, et al. Abnormalities in the temporal patterning of lower extremity muscle activity in hemiparetic gait. *Gait & Posture*, 2007, 25(3): 342-352
- 24 黄萍, 钟慧敏, 陈博等. 正常青年人三维步态: 时空及运动学和运动力学参数分析. 中国组织工程研究, 2015, 19(24): 3882-3888

- Huang Ping, Zhong Huimin, Chen Bo, et al. Three-dimensional gait analysis in normal young adults: temporal, kinematic and mechanical parameters. *Chinese Journal of Tissue Engineering*, 2015, 19(24): 3882-3888 (in Chinese)
- 25 桑德春, 卢利萍, 邵春霞等. 老年脑卒中偏瘫患者的三维步态分析. *中国康复理论与实践*, 2013, 19(9): 860-862
- Sang Dechun, Lu Liping, Shao Chunxia, et al. 3D gait analysis for old hemiplegic patients. *Chinese Rehabilitation Theory and Practice*, 2013, 19(9): 860-862 (in Chinese)
- 26 李芳, 郑洁皎. 表面肌电图在脑卒中患者异常步态分析中的研究进展. *中国康复理论与实践*, 2016, 22(10): 1159-1162
- Li Fang, Zheng Jiejiao. Application of surface electromyography in abnormal gait analysis for stroke. *Chinese Rehabilitation Theory and Practice*, 2016, 22(10): 1159-1162 (in Chinese)
- 27 何庆华, 吴宝明, 彭承琳. 表面肌电信号的分析与应用. *国外医学 (生物医学工程分册)*, 2000(5): 299-303
- He Qinghua, Wu Baoming, Peng Chenglin. Analysis and application of SEMG signals. *International Journal of Biomedical Engineering*, 2000(5): 299-303 (in Chinese)
- 28 刘立安, 王蕾. 基于表面肌电图电针治疗颈椎病临床观察. *上海针灸杂志*, 2015, 34(2): 158-160
- Liu Li'an, Wang Lei. Clinical observation of treatment of cervical spondylosis based on SEMG electroacupuncture. *Shanghai Journal of Acupuncture*, 2015, 34(2): 158-160 (in Chinese)
- 29 黄萍, 齐进, 邓廉夫等. 正常青年人自然步态下肢肌的表面肌电图分析. *中国组织工程研究*, 2012, 16(20): 3680-3684
- Huang Ping, Qi Jin, Deng Lianfu, et al. Surface electromyography analysis of lower limb muscles with natural gait in normal young people. *Chinese Journal of Tissue Engineering*, 2012, 16(20): 3680-3684 (in Chinese)
- 30 Kirker BSG. Stepping before standing: hip muscle function in stepping and standing balance after stroke. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2000, 68(4): 458-464
- 31 Gatherine DK, Thomas SR, Günter R. Surface electromyography and muscle force: limits in SEMG-force relationship and new approaches for applications. *Clinical Biomechanics*, 2009, 24(3): 225-235
- 32 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. *南京体育学院学报 (自然科学版)*, 2003(2): 6-12
- Shi Baoxing, Wei Wenyi. Calculation method of reverse dynamics and discussion on improving calculation accuracy. *Journal of Nanjing Sport Institute (Natural Science Edition)*, 2003(2): 6-12 (in Chinese)
- 33 Zajac FE, Neptune RR, Kautz SA. Biomechanics and muscle coordination of human walking: part II: lessons from dynamical simulations and clinical implications. *Gait & Posture*, 2003, 17(1): 1-17
- 34 徐欢欢, 何育民, 孙朝阳等. Anybody 环境下人体步态的逆向动力学研究. *机械科学与技术*, 2019, 38(12): 1819-1824
- Xu Huanhuan, He Yumin, Sun Chaoyang, et al. Research of reverse dynamics of human gait via Anybody technology. *Mechanical Science and Technology*, 2019, 38(12): 1819-1824 (in Chinese)
- 35 高许峥妍, 李涵达. 人体下肢动作仿真综述. *机电信息*, 2016(6): 76-77, 79
- Gao Xuzhengyan, Li Handa. Overview of human lower limb movement simulation. *Electromechanical Information*, 2016(6): 76-77, 79 (in Chinese)
- 36 Kamono A, Ogihara N. Three-dimensional inverse dynamic analysis of cane-assisted gait in patients with hemiplegic stroke. *Journal of the Society of Biomechanisms*, 2018, 42(3): 177-184
- 37 Nandy A, Chakraborty P. A study on human gait dynamics: modeling and simulations on Opensim platform. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 76(20): 21365-21400
- 38 钱竞光, 苏超, 叶强. 人体平面运动动作多体系统动力学计算机模拟设计系统软件的研制. *南京体育学院学报 (自然科学版)*, 2006(1): 1-4, 9
- Qian Jingguang, Su Chao, Ye Qiang. Development of computer simulation design software for multi-body system dynamics of human body plane motion. *Journal of Nanjing Sport Institute (Natural Science Edition)*, 2006(1): 1-4, 9 (in Chinese)
- 39 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. *中国康复医学杂志*, 2011, 26(6): 538-542
- Ma Ni, Xiao Liying. Biomechanical analysis of personalized artificial knee joint design based on Lifemod. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2011, 26(6): 538-542 (in Chinese)
- 40 冯雷. 基于 Lifemod 建模——青年男性正常步态的下肢动力学分析. [硕士学位论文]. 南京: 南京体育学院, 2017
- Feng Lei. Lower limb dynamics analysis based on Lifemod modeling of normal gait in young men. [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing Sport Institute, 2017 (in Chinese)
- 41 束一铭, 钱竞光, 戎科等. 偏瘫患者步态特征的动力学仿真分析. *医用生物力学*, 2017, 32(6): 535-540
- Shu Yiming, Qian Jingguang, Rong Ke, et al. Dynamic simulation analysis of gait characteristics in patients with hemiplegia. *Medical Biomechanics*, 2017, 32(6): 535-540 (in Chinese)
- 42 戎科. 偏瘫步态的建模及动态电刺激康复研究. [硕士学位论文]. 南京: 南京体育学院, 2012
- Rong Ke. Modeling of gait of hemiplegia and study on dynamic electrical stimulation rehabilitation. [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing Sport Institute, 2012 (in Chinese)
- 43 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. *南京体育学院学报 (自然科学版)*, 2015, 14(5): 38-42
- Rong Ke, Qian Jingguang. Modeling comparison between Lifemod and Opensim in sports biomechanical simulation modeling software. *Journal of Nanjing Sport Institute (Natural Science Edition)*, 2015, 14(5): 38-42 (in Chinese)
- 44 Trinler U, Schwameder H, Baker R, et al. Muscle force estimation in clinical gait analysis using Anybody and Opensim. *Journal of Biomechanics*, 2019, 86: 55-63
- 45 陈阳国, 刘彤, 王汝恒等. 人体脊椎腰段有限元建模及其力学分析. *西南科技大学学报*, 2018, 33(2): 65-71

- Chen Yangguo, Liu Tong, Wang Ruheng, et al. Finite element modeling and mechanical analysis of human lumbar vertebrae. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2018, 33(2): 65-71 (in Chinese)
- 46 胡小春, 郭松青, 叶铭. 基于 CT 图像建立人体足部骨骼三维有限元模型的研究. *合肥工业大学学报 (自然科学版)*, 2005(9): 1188-1191
- Hu Xiaochun, Guo Songqing, Ye Ming. A Three-dimensional finite element model of human foot bone based on CT images. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005(9): 1188-1191 (in Chinese)
- 47 林玉屏. 基于 TKA 的人体下肢步态分析及仿真. [硕士论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2017
- Lin Yuping. Gait analysis and simulation of human lower limbs based on TKA. [Master Thesis]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017 (in Chinese)
- 48 卢昌怀, 余斌, 陈辉强等. 正常步态下距骨三维有限元模型的建立及应力分析. *南方医科大学学报*, 2010, 30(10): 2273-2276
- Lu Changhuai, Yu Bin, Chen Huiqiang, et al. Establishment of 3D finite element model of talus under normal gait and stress analysis. *Journal of Southern Medical University*, 2010, 30(10): 2273-2276 (in Chinese)
- 49 王芑斌, 钟锦然, 何坚等. 基于步态分析建立膝关节三维有限元模型. *康复学报*, 2016, 26(3): 5-11
- Wang Xiangbin, Zhong Jinran, He Jian, et al. 3D finite element model of knee joint based on gait analysis. *Chinese Journal of Rehabilitation*, 2016, 26(3): 5-11 (in Chinese)
- 50 Bennell Kim L, Wrigley Tim V, Hunt Michael A, et al. Update on the role of muscle in the genesis and management of knee osteoarthritis. *Rheumatic Diseases Clinics of North America*, 2013, 39(1): 145-176
- 51 Kiapour A, Kiapour AM, Kaul V, et al. Finite element model of the knee for investigation of injury mechanisms: development and validation. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2014, 136(1): 0110021
- 52 Qian JG, Li Z, Zhang H, et al. Effectiveness of selected fitness exercises on stress of femoral neck using musculoskeletal dynamics simulations and finite element model. *Journal of Human Kinetics*, 2014, 41(1): 59-70

(责任编辑: 胡漫)