

OpenSim 肌骨模型在骨伤科生物力学研究中的应用思路探讨

李锐¹, 刘洋², 张兆杰¹, 张鑫微¹, 张琰朕¹, 胡滢琦¹, 杨灿¹, 毛舒石¹, 邱佳明¹

(1. 中国中医科学院望京医院, 北京 100102; 2. 北京中医药大学东方医院, 北京 100078)

【摘要】 OpenSim 是一款开源、免费的运动模拟与步态分析软件, 可用于动态模拟和分析人体的复杂运动, 目前在人体的生物力学研究中被广泛运用。由于 OpenSim 可以分析人体运动时的肌肉力量、关节力矩、肌肉协同激活等多维运动数据, 可用于研究骨伤科筋骨失衡疾病和各种治疗手段的生物力学机制, 在中医骨伤领域具有广泛的应用前景。通过对 OpenSim 的基本特点、要素、分析流程、应用前景进行分析认为, OpenSim 肌骨模型在中医骨伤科领域有较大的应用空间, 有助于阐述筋骨疾病的发病机制和手法的治疗机制, 推动骨伤科疾病诊治的精准化。OpenSim 肌骨模型的运用可以解决以往研究重视骨错缝, 对筋出槽关注不足的问题, 为骨伤科疾病的研究提供新方法。目前 OpenSim 的推广运用中还存在设备需求大、操作门槛高等问题, 建议后续研究者可以采取多学科合作、开展临床研究、数据共享等研究策略以推动学科发展。

【关键词】 OpenSim; 肌骨模型; 多学科交叉; 筋骨疾病; 综述

中图分类号: R274.9

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20240163

Application of OpenSim musculoskeletal model in biomechanics research of orthopedics and traumatology

LI Rui¹, LIU Yang², ZHANG Zhao-jie¹, ZHANG Xin-wei¹, ZHANG Yan-zhen¹, HU Yan-qi¹, YANG Can¹, MAO Shu-shi¹, QIU Jia-ming¹ (1. Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Science, Beijing 100102, China; 2. Dongfang Hospital, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100078, China)

ABSTRACT OpenSim is an open source, free motion simulation and gait analysis software, which can be used to dynamically simulate and analyze the complex motion of the human body, and is widely used in human biomechanical research. Since OpenSim can analyze multi-dimensional motion data such as muscle strength, joint torque, and muscle synergistic activation during human movement, it can be used to study the biomechanical mechanism of musculoskeletal imbalance diseases and various treatment methods in TCM orthopedics, and has a broad application prospect in the field of TCM orthopedics. By the analysis of the basic characteristics, elements, analysis process, and application prospects of OpenSim, it is concluded that OpenSim musculoskeletal model has a large application space in the field of traditional Chinese medicine orthopedic, which is helpful to explain the pathogenesis and mechanism of diseases, and promote the precision diagnosis and treatment of orthopedics diseases; the application of OpenSim musculoskeletal model can solve the problem that the previous research paid attention to the bone malalignment and not enough attention to the tendon, and provide a new method for the research of orthopedic diseases. At present, there are still problems in the promotion and application of OpenSim, such as large equipment requirements and high operation threshold. Therefore, multidisciplinary cooperation, clinical research, and data sharing are the basic research strategies in this field.

KEYWORDS OpenSim; Musculoskeletal model; Interdisciplinary; Muscle and bone diseases; Review

生物力学是应用力学原理和方法对生物体中的力学问题定量分析的生物物理学的分支学科, 其在

医学领域的运用极大地提高了临床诊疗水平^[1-3]。随着生物力学研究的不断深入, 研究者发现传统的实验测量方法包括尸体研究、离体试验、在体试验等逐渐不能满足研究需求, 主要体现在试验测量较难获得人体的肌肉力等关键数据, 并且试验研究也难以分析复杂运动的协调关系^[4-5]。人体运动的动态模拟为解决这些问题提供了思路^[6-7], 但开发运动模拟软件的技术要求和成本较高, 大多研究者不具备开发能力, 这阻碍了生物力学的交流和发展。为了应对

基金项目:北京市中医药科技发展资金项目(编号:BJZYB-2023-37); 中国中医科学院科技创新工程重大攻关项目(编号:CI2021A02007)

Fund program: Beijing TCM Science and Technology development Fund (No. BJZYB-2023-37)

通信作者: 张兆杰 E-mail: zhangzhaojie2010@163.com

Corresponding author: ZHANG Zhao-jie E-mail: zhangzhaojie2010@163.com

这些问题,斯坦福大学的 DELP 等^[5]于 2007 年推出了免费、开源的运动仿真软件 OpenSim,该软件可用于构建肌骨模型和动态模拟运动,并分析人体运动的运动学、动力学、肌肉控制和激活程度^[8]。近年来,OpenSim 已成为运动科学、骨科、康复、神经病学、机器人外骨骼等领域生物力学研究的热门工具^[9-12],相关研究的年度发文量逐年上升,在医学领域广泛用于分析人体生物力学,但在中医骨伤科的生物力学研究中运用较少。作为一款开源、个性化的运动模拟和分析软件,该平台可以分析人体运动中的多维数据,可用于研究筋骨疾病的发病机制和治疗手段,在中医骨伤领域有广泛的应用前景。本研究拟介绍 OpenSim 的基本特点和研究要素,探讨其在骨伤科生物力学研究中的应用思路和研究策略,为其他研究者使用该方法提供参考。

1 OpenSim 的基本特点

在构建肌骨模型时,先通过 OpenSim 定义模型的组件(刚体、肌肉)、属性(如身体质量、肌纤维长度)以及每个组件之间的连接来完成模型的创建,然后由 OpenSim 生成一组控制模型运动学和动力学的方程来进行运动控制,其理论基础是 Hill-type 肌肉-肌腱模型^[13]。在模拟运动过程中,研究者可使用 OpenSim 提供的计算工具来获取模型中各部分的状态和参数并将其导出以便于储存和分析。OpenSim 通过仿真模拟肌肉骨骼动力学和神经肌肉控制来研究人体运动,具有以下基本特点:(1)个性化建模。用户可直接将开发者提供的模型缩放后进行特定个体的生物力学分析,也可根据研究需要自行开发带有各种植入物或辅助设备的肌骨模型。(2)弥补试验研究不足。使用者可以通过模拟肌肉骨骼动力学和神经肌肉控制来获得试验难以测量的数据,如关节负荷和肌肉力量。(3)预测运动。研究者无须试验就可仅依靠神经肌肉控制预测人体在不同状态下的运动和反应,如预测负重和倾斜行走时的肌肉协调关系,

预测膝关节锁定后的反应。(4)代码开源和共享。用户可在 Github 网站直接下载 OpenSim 的源代码并根据研究需要在原基础上自行开发分析工具,可上传至官方论坛后供其他研究者使用。这些基本特征使得 OpenSim 在骨伤科生物力学研究中具有广阔的应用前景,能够满足研究的个性化、精准化需求。

2 OpenSim 肌骨建模要素

2.1 肌骨模型

模型是加载运动的载体,因此模型的构建和选择对于后续分析具有决定性作用。OpenSim 在其官方网站和安装包中提供了多个通用模型以供研究者使用^[14-17],包括步态分析模型、上肢模型、下肢模型、腕部模型、踢足球模型等(图 1)。研究者可根据研究需要选择合适的模型后依据受试者个体特征调整,通过设定模型体重、标记点位置、缩放权重、测量设置以及配置文件完成模型的缩放,生成个体化的肌骨模型。当开发者提供的基础模型不能满足研究需求时,研究者也可以结合 CT 或 MRI 资料运用 Mimics 软件逆向构建骨骼模型,根据肌肉的生理横截面积确定肌肉走向和起止点,将构建的模型文件转化为 OpenSim 可识别的几何学文件后导入模型,形成新的个体肌骨模型^[18]。此外,还可以使用三维建模软件设计各种植入物,将其导入 OpenSim 进行人机耦合,为模型添加固定器械并完成后续分析功能。这些个体化建模方法保证了研究者能够充分考虑试验条件后根据研究需要确定模型,保证了分析结果的可靠性和准确性。

2.2 加载运动

运动数据包含运动学和动力学两部分。运动学数据可以通过动作捕捉设备(如 Vicon 和 OptiTrack)进行采集,通常为 c3d 格式,这种文件格式通常包含标记点坐标、时间戳等信息。在分析时通常需要将其转化为 OpenSim 可识别的 TRC 和 MOT 格式文件,其中包含关节位置、关节速度、加速度、力矩等关键

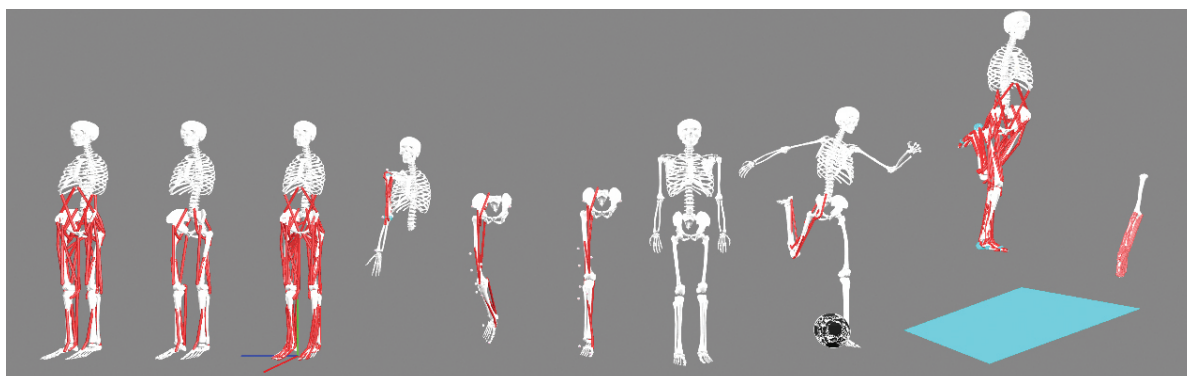


图 1 OpenSim 提供的通用肌骨模型
Fig.1 Generic musculoskeletal model provided by OpenSim

信息,然后加载到上一步构建的肌骨模型中。动力学数据通常通过三维测力台采集,通常包含地面反作用力和压力中心等信息,在分析过程中用于计算逆向动力学、静态优化、计算肌肉控制等。

2.3 模型验证

在进行运动仿真分析时,模型是否能真实反映运动直接关系到研究结果的可靠性和实用性,因此在建模完成后对模型的验证是关键步骤^[19-20]。OpenSim 的开发者 Delp 教授提出了运动仿真模型验证基本思路^[21]。具体内容包括:(1)将仿真模拟输出的分析结果与试验测量的数据比较分析,用于验证模型的数据必须区别于用于校准模型的数据。如在建模过程中,动作捕捉数据会用于校准模型以确认模型的运动是否与实际人体的运动相符,但不可以用于验证模型分析结果是否真实;此时可以使用肌电图、影像数据、地面反作用力或尸体标本中测得的数据来验证模型,原因在于这些数据并未参与建模,并且这些数据的来源是实际测量而非推导所得。(2)将研究所得到的数据与以往研究进行比较。如将分析所获得的数据(包括关节角度、力矩、肌肉激活力、关节内部载荷等)与先前已发表的相关研究中所建立的模型输出的数据进行比较,因为这些已发表的研究模型通常经过试验验证,其分析数据能较好地反映真实情况。

3 OpenSim 的基本功能和 workflows

3.1 运动的逆向分析

逆向分析是指通过运动相关数据计算产生这个运动的各种数值,通常是指基于测量得到的运动数据计算关节角度和坐标、关节移动、关节力矩、肌肉力量、肌肉激活等。基本分析流程见图 2,首先通过动作捕捉系统收集模型的标记点轨迹,将其与模型进行配准后基于逆向运动学工具(inverse kinematics, IK)计算出关节角度和位置等信息,将模型、运动学数据、外部载荷数据作为输入,基于逆向动力学(inverse dynamics, ID)求解方程计算出产生该运动的每个关节处的净力和力矩,即动力学数据^[22]。静态优化(static optimization)工具是逆向动力学的扩展,该工

具可进一步将每个时间点的关节力矩分解计算为关节附近肌肉的力量,同时计算不同时间点的肌肉激活程度。逆向分析所获得的数据对于理解人体生理和病理状态下的运动具有重要意义,既可发现和描述异常运动,又可对这些异常运动的原因进行分析。

3.2 正向分析

在逆向分析中,模型的运动是已知的,计算的目的是获得产生这些运动的力和力矩,而正向分析(forward dynamics)则是计算在关节力和力矩的作用下,模型的位置和速度如何改变。人体运动时,首先由运动神经元产生动作电位并通过神经-肌肉接头将兴奋传递至骨骼肌,骨骼肌通过兴奋-收缩耦联进行收缩,此时由于肌肉的收缩产生了关节力矩,而关节力矩会引起多关节运动形成动力学耦合,并且在此过程中脑干和中枢会根据传入神经的信息来进行运动协调。正向分析过程则会模拟这种协调运动,模型、外部载荷、模型控制(例如肌肉兴奋)、模型的初始状态(包括初始的关节角度、速度、肌肉激活、肌肉纤维长度等)作为输入信息,输出的结果即是运动。并且在正向分析中,可以获得在运动过程中模型上每个组件的运动学数据(如坐标、速度、加速度、质心)、动力学数据(肌肉的力量、效率)以及关节对运动的反应(如关节载荷)。在正向运动分析过程中,研究者可以修改模型参数(如刚体的质量、惯性、关节初始位置、速度)和控制参数(如肌肉激活度)作为变量,预测这些变化对运动造成的影响。这一分析方式在临床中可以应用于预测患者在特定条件下的运动表现,有利于评估患者的运动能力,制定个性化的康复计划并预测治疗效果。

4 OpenSim 在骨伤领域的应用前景

4.1 基于筋骨理论的疾病发病机制研究

筋骨理论认为,在生理状态下人体的筋和骨相互依存相互协调,“筋束骨,骨张筋”,筋骨平衡则人体能够正常运动;而在病理状态下,筋不能束骨则发生骨错缝,骨错缝后又加重筋出槽,两者相互影响共同导致各种疾病发生^[23]。筋骨失衡是骨伤科疾病的核心病机,筋与骨在疾病发生发展过程中共同发

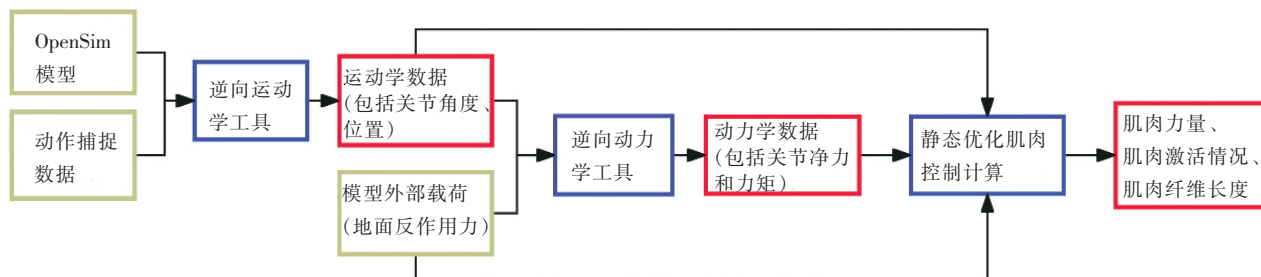


图 2 OpenSim 逆向分析的基本流程

Fig.2 Basic procedure of inverse analysis pipeline of OpenSim

挥作用。但目前的各种研究关注骨错缝较多,如运用影像检查、有限元等手段分析骨错缝在发病中的作用,针对筋(包括肌肉、韧带、半月板、椎间盘等结构)的各种研究开展较少,其水平相对滞后^[24]。其原因在于目前常用的研究手段大多只能客观反映筋的状态,而不能直接反映筋的功能及其在发病中的作用,例如运用 MRI 评价肌肉时仅能从横截面积、脂肪浸润程度或软组织张力测试系统客观反映其功能^[25],而不能获得肌肉激活程度、肌肉力量等关键指标;或是研究关节疾病时,大多数只能通过 MRI 评估关节面或半月板的形态特征^[26],却难以获得关节内压力等关键数据。在筋骨疾病发生发展过程中,筋具体发挥了什么功能或呈现何种异常状态对于解释疾病成因至关重要,理解这些问题有利于疾病的早期预防和精准治疗。

对于筋的病理状态的解释和分析,OpenSim 可以发挥重要作用,用于解释筋骨疾病的发病机制。目前国内针对筋出槽的理解大多停留在理论推测层面,客观依据不足,而使用 OpenSim 这一工具则可以通过肌骨建模和逆向动力学方法研究筋的作用。例如在研究颈椎病的生物力学特征时,可以采集正常人和患者的运动学数据,使用逆向动力学工具分析每组受试者的颈部肌肉力量和激活状态并进行比较,发现有差异的结果后使用 OpenSim 的正向分析工具或有限元方法分析这些肌肉异常状态对颈椎应力和运动特性的影响,探讨筋在疾病发病中的作用。或运用逆向动力学工具计算关节炎患者行走时下肢的肌肉力量和关节力矩,与健康受试者对比,分析关节炎患者下肢的生物力学特性以指导临床治疗。

4.2 正骨手法的疗效评价及作用机制研究

目前国内大多手法相关的临床研究均采用疼痛视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)、SF-36 等量表对患者的主观感受进行量化,缺乏客观的疾病评价指标,导致手法相关的随机对照研究质量较差^[27]。而 OpenSim 工具可对受试者手法治疗前后的运动学和动力学情况进行客观评价,因此其输出的分析结果可作为正骨手法疗效评价的潜在指标。

使用 OpenSim 工具评估正骨手法的生物力学机制时,可通过评估手法治疗前后受试者各项分析结果的变化来分析手法的治疗作用。有学者^[28]认为肌肉的动力平衡作用对维持脊柱的健康至关重要,颈椎病的发病与肌肉异常导致的动力失衡密切相关。因此,可以使用 OpenSim 在颈椎手法治疗前后对患者的颈部运动学和动力学数据进行计算,分析手法操作前后肌肉力量、肌肉激活的改变,探讨手法治疗颈椎病的生物力学机制。

4.3 不同手术方式的治疗效果

对于同一骨科疾病选择不同的手术方式会产生不同的效果,在术前充分了解每种手术方式的影响并根据患者情况选择合适的方式对患者的预后至关重要。使用 OpenSim 进行运动仿真分析可以充分评估不同手术方式对人体生物力学的影响,便于临床医生做出决策。如在分析骨科植入物对人体力学影响方面,WESSELING 等^[29]使用 OpenSim 分析了接受全髋关节置换术和髋关节表面置换术后 1 年两组患者的髋关节接触力和下肢运动模式,结果发现与健康人相比,接受两种手术的患者髋关节接触力均有所下降,差异无统计学意义($P>0.05$),但接受手术的患者表现出异常的运动模式和步态,这种异常步态可能是为了降低髋关节负荷的代偿反应。在比较不同手术方式对人体影响方面,KUMARAN 等^[30]使用 OpenSim 和有限元分析了开放和微创的经椎间孔腰椎融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)对腰椎活动度、临近节段椎间盘内压力的影响,该研究首先构建了 TLIF 的腰椎有限元模型并获得了模型的活动度,通过调整肌肉横截面积来模拟不同手术方式对肌肉的破坏,随后基于活动度在 OpenSim 中预测肌肉力量,将预测到的肌肉力量 and 活动度添加到有限元模型中,分析手术后腰椎运动时不同部位的应力,结果发现 TLIF 术后腰椎的活动度增大,并且开放手术造成的肌肉横截面积减少增加了邻椎椎间盘内的压力,可能造成邻近节段应力异常并导致术后持续的腰痛,其研究结果支持在有条件时尽量采取微创技术。此外,还有研究者^[31]使用 OpenSim 分析了前交叉韧带重建后躯干和下肢的神经肌肉代偿的原因并基于此来制定治疗方案。在中医骨伤科的生物力学研究中,可以使用 OpenSim 的逆向运动学、动力学、静态优化等来分析各种固定器械对人体的影响,例如分析小夹板、石膏、外固定架等固定方式对人体关节活动、力矩、肌肉等结构的影响,以充分认识各种固定器械的生物力学效应,帮助制定临床决策。

5 研究策略

5.1 多学科合作

尽管 OpenSim 的图形用户界面(graphics user interface, GUI)操作并不复杂,但对于不具备生物力学和计算机知识的临床医生来讲仍然有一定难度。因此,在开展 OpenSim 相关的中医骨伤研究时,应鼓励计算机科学、生物力学、骨科医生、康复师等多学科专家共同合作,根据研究需要改进分析工具,使研究工具充分适应中医骨伤科的特点,共同完成跨学科的高水平研究。此外,多学科合作也能够融汇不同

领域的知识,弥补单一学科视角的局限性,通过多学科方法论的借鉴融合,培养创新思维的同时也能够形成对科学问题更加全面和深入的认识。

5.2 开展高水平的临床研究

针对中医骨伤领域临床试验的研究特点,设计实施基于 OpenSim 的临床研究。OpenSim 可以根据受试者的运动学和动力学数据计算出肌肉力量、肌肉激活度、关节力矩等试验测量难以获得的数据,充分评估骨伤科各种治疗手段的疗效并探索其生物力学机制。高水平的临床研究成果也有利于提高中医骨伤的循证研究水平,促进中医骨伤特色治疗方法的应用推广。

5.3 数据共享

骨伤科疾病的发生与生物力学关系密切,认识骨伤科疾病的生物力学特征可以加深对疾病发病机制的认识,有利于寻找更加精准的治疗措施,并且寻找一些疾病生物力学相关的疗效评价指标。因此,在研究中可以使用 OpenSim 分析骨伤科疾病的生物力学特征,推动建立骨伤科疾病的生物力学数据库;同时着力推动骨伤科生物力学数据的规范采集,促进数据的共享和标准化,以提高骨伤科的生物力学研究水平。

6 优势及不足

目前学术界常用的人体运动仿真软件如 LifeMOD、Anybody 和 ANSYS 有限元软件各有不足:LifeMOD 对人体肌肉的控制精度不足,Anybody 对人体的精细运动模拟不够精准,ANSYS 有限元多是在静态加压状态下模拟运动。而与之相比,OpenSim 在人体的精细运动和肌肉特性的控制精度方面较有优势,并且动态模拟运动也与实际运动的过程更加符合。此外,OpenSim 平台还具有以下优势:(1)支持多系统运行。OpenSim 可以分别在 Windows, Linux 和 MacOS 等操作系统上运行,使用不受电脑操作系统的限制。(2)扩展性强。由于 OpenSim 的代码开源,因此使用者可以根据需要在源代码基础上自行开发分析工具并将 OpenSim 与其他分析和建模软件共同使用,目前 OpenSim 已支持与 Matlab 和 Blender 等软件交互使用。(3)社区支持。OpenSim 的开发者为研究者提供了官方论坛以供研究者交流经验,在官方论坛可以下载到其他研究者开发的肌骨模型和分析工具。(4)开源免费。相较于其他价格昂贵的商业软件,OpenSim 的代码开源和完全免费有利于推广和普及。

但目前 OpenSim 也存在一些不足限制了其在骨伤科生物力学研究中的运用:(1)操作门槛高。尽管 OpenSim 的图像用户界面操作便捷,但仍然要求使

用者具备一定的计算机、生物力学方面的专业知识。(2)计算性能需求高。在运行仿真和复杂模型时仍然需要一定的运算资源,不适合低配置的计算机。(3)设备需求大。OpenSim 运动仿真通常需要采集运动捕捉数据,此类设备价格昂贵并且占地面积相对较大,在门诊较难开展。软件的更新迭代为此问题提供了新的解决方法,在 2021 年 3 月发布的 OpenSim 4.2 版本中新增了基于惯性传感单元(inertial measurement units, IMU)的逆运动学工具,使用该工具能够通过 IMU 采集的运动学信息来进行后续的逆运动学分析,使得研究者可以不受运动捕捉设备的限制,并且 IMU 设备相比动作捕捉设备还具有成本低、精度高、便携等优势。

综上所述,本研究介绍了 OpenSim 肌骨模型的基本功能和一般的分析流程,讨论了其在骨伤科领域的应用价值和优缺点。在生物力学研究中,传统的在体和离体试验仍然是较为公认的研究手段,而 OpenSim 的发展和推广可以弥补实验研究的不足,提高骨伤科生物力学的研究水平。尽管当前 OpenSim 在骨伤科领域的应用仍然较少,但其在研究肌肉和筋的功能方面具有不可忽视的优势,为研究者深刻认识中医骨伤的筋骨理论提供了新方法。

利益冲突:所有作者声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] 季伟,黄志平,李若瑶,等.斜坡固定钢板行前路枕颈固定的生物力学研究[J].中华骨科杂志,2022,11:722-729.
JI W, HUANG Z P, LI R Y, et al. Anatomical and biomechanical studies of anterior occipitocervical fixations[J]. Chin J Orthop, 2022, 11: 722-729. Chinese.
- [2] 刘强,张军,孙树椿,等.有限元在脊柱生物力学中的应用[J].中国骨伤,2017,30(2):190-194.
LIU Q, ZHANG J, SUN S C, et al. Application of finite element method in spinal biomechanics[J]. China J Orthop Traumatol, 2017, 30(2): 190-194. Chinese.
- [3] 徐静静,蔡景龙,王黔,等.人瘢痕组织脱细胞真皮基质的组织结构和生物力学性能[J].中华医学杂志,2015,10:770-775.
XU J J, CAI J L, WANG Q, et al. Structural and biomechanical properties of acellular dermal matrix derived from human scar tissue [J]. Natl Med J China, 2015, 10: 770-775. Chinese.
- [4] ZAJAC F E, GORDON M E. Determining muscle's force and action in multi-articular movement[J]. Exerc Sport Sci Rev, 1989, 17: 187-230.
- [5] DELP S L, ANDERSON F C, ARNOLD A S, et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2007, 54(11): 1940-1950.
- [6] PIAZZA S J. Muscle-driven forward dynamic simulations for the study of normal and pathological gait[J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2006, 3(1): 5.
- [7] NEPTUNE R R. Computer modeling and simulation of human movement. Applications in sport and rehabilitation[J]. Phys Med Rehabil Clin N Am, 2000, 11(2): 417-434, viii.

- [8] SETH A, HICKS J L, UCHIDA T K, et al. OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement[J]. *PLoS Comput Biol*, 2018, 14(7): e1006223.
- [9] MAHADAS S, MAHADAS K, HUNG G K. Biomechanics of the golf swing using OpenSim[J]. *Comput Biol Med*, 2019, 105: 39–45.
- [10] MEIRELES S, GROOTE F D, REEVES N D, et al. Knee contact forces are not altered in early knee osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2016, 45: 115–120.
- [11] YUE-WEN, MING-LIU, SI J, et al. Adaptive control of powered transfemoral prostheses based on adaptive dynamic programming[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2016, 2016: 5071–5074.
- [12] SCARTON A, JONKERS I, GUIOTTO A, et al. Comparison of lower limb muscle strength between diabetic neuropathic and healthy subjects using OpenSim[J]. *Gait Posture*, 2017, 58: 194–200.
- [13] HOLMES J W. Teaching from classic papers: hill's model of muscle contraction[J]. *Adv Physiol Educ*, 2006, 30(2): 67–72.
- [14] RAJAGOPAL A, DEMBIA C L, DEMERS M S, et al. Full-body musculoskeletal model for muscle-driven simulation of human gait[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2016, 63(10): 2068–2079.
- [15] LAI A K M, ARNOLD A S, WAKELING J M. Why are antagonist muscles co-activated in my simulation? A musculoskeletal model for analysing human locomotor tasks[J]. *Ann Biomed Eng*, 2017, 45(12): 2762–2774.
- [16] SETH A, MATIAS R, VELOSO A P, et al. A biomechanical model of the scapulothoracic joint to accurately capture scapular kinematics during shoulder movements[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0141028.
- [17] MODENESE L, PHILLIPS A T, BULL A M. An open source lower limb model: hip joint validation[J]. *J Biomech*, 2011, 44(12): 2185–2193.
- [18] 梅齐昌, 顾耀东, 孙冬, 等. 基于影像学构建个体化 OpenSim 下肢肌骨模型的生物力学研究应用进展[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(2): 259–264.
- MEI Q C, GU Y D, SUN D, et al. Progress on biomechanical research of image-based subject-specific OpenSim lower extremity musculoskeletal model[J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(2): 259–264. Chinese.
- [19] ANDERSON A E, ELLIS B J, WEISS J A. Verification, validation and sensitivity studies in computational biomechanics[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2007, 10(3): 171–184.
- [20] HENNINGER H B, REESE S P, ANDERSON A E, et al. Validation of computational models in biomechanics[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2010, 224(7): 801–812.
- [21] HICKS J L, UCHIDA T K, SETH A, et al. Is my model good enough? Best practices for verification and validation of musculoskeletal models and simulations of movement[J]. *J Biomech Eng*, 2015, 137(2): 020905.
- [22] 宋和胜, 钱竞光, 唐潇. 基于软件 OpenSim 的人体运动建模理论及其应用领域概述[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(4): 373–379.
- SONG H S, QIAN J G, TANG X. Summary of software OpenS im with focus on its human motion modeling theory and application field[J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(4): 373–379. Chinese.
- [23] 李锐, 张兆杰, 张世民, 等. 疏筋整复手法治疗寰枢关节错缝所致颈性眩晕 65 例临床观察[J]. *中医杂志*, 2022, 63(5): 450–454.
- LI R, ZHANG Z J, ZHANG S M, et al. Sinew dredging and reduction manipulation for treating 65 cases of atlantoaxial joint staggered seam-induced cervical vertigo[J]. *J Tradit Chin Med*, 2022, 63(5): 450–454. Chinese.
- [24] 张英杰, 刘元梅, 唐树杰. 脊柱“骨错缝、筋出槽”研究现存问题的思考[J]. *环球中医药*, 2021, 14(1): 135–137.
- ZHANG Y J, LIU Y M, TANG S J. Reflections on the existing problems in the study of "bone dislocation and tendon out of groove" in spine[J]. *Glob Tradit Chin Med*, 2021, 14(1): 135–137. Chinese.
- [25] 胡零三, 赵焯, 张承哲, 等. 腰椎间盘突出症患者腰骶部多裂肌脂肪变化的影像学研究[J]. *中国骨伤*, 2020, 33(2): 173–177.
- HU L S, ZHAO Y, ZHANG C Z, et al. Imaging study of lumbosacral multifidus muscle fat changes in patients with lumbar disc herniation[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2020, 33(2): 173–177. Chinese.
- [26] 刘心, 冯华, 洪雷, 等. 关节镜下创面新鲜化处理治疗稳定型内侧半月板 ramp 损伤的临床研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2015, 34(8): 730–734.
- LIU X, FENG H, HONG L, et al. Short-term clinical outcomes of arthroscopic refresh treatment for stable ramp lesion[J]. *Chin J Phys Med*, 2015, 34(8): 730–734. Chinese.
- [27] 魏戌, 王旭, 孙凯, 等. 中医手法治疗颈椎病的研究现状与展望[J]. *中华中医药杂志*, 2020, 35(10): 4781–4784.
- WEI X, WANG X, SUN K, et al. Research status and prospect of TCM manipulation in the treatment of cervical spondylosis[J]. *China J Tradit Chin Med Pharm*, 2020, 35(10): 4781–4784. Chinese.
- [28] 杨钦, 周红海, 胡梦婷, 等. 浅析颈椎病相关动静力学平衡[J]. *颈腰痛杂志*, 2021, 42(1): 131–133, 139.
- YANG Q, ZHOU H H, HU M T, et al. Analysis of dynamic and static mechanical balance related to cervical spondylosis[J]. *J Cervic Lumb*, 2021, 42(1): 131–133, 139. Chinese.
- [29] WESSELING M, MEYER C, CORTEN K, et al. Does surgical approach or prosthesis type affect hip joint loading one year after surgery[J]. *Gait Posture*, 2016, 44: 74–82.
- [30] KUMARAN Y, SHAH A, KATRAGADDA A, et al. Iatrogenic muscle damage in transforaminal lumbar interbody fusion and adjacent segment degeneration: a comparative finite element analysis of open and minimally invasive surgeries[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(9): 2622–2630.
- [31] BOGGESS G, MORGAN K, JOHNSON D, et al. Neuromuscular compensatory strategies at the trunk and lower limb are not resolved following an ACL reconstruction[J]. *Gait Posture*, 2018, 60: 81–87.

(收稿日期: 2024-07-04 本文编辑: 李宜)