

* 论著——康复医学 *

膝关节对于足底支撑的生物力学响应：人体下肢计算机仿真

刘璇^{1,2}, 张明^{1,2}, 樊瑜波³

1.香港理工大学深圳研究院, 深圳 518057

2.香港理工大学生物医学工程跨领域学部, 香港

3.北京航空航天大学生物科学与医学工程学院, 北京 100191

摘要 本研究的主要目的是通过建立人体膝踝足有限元模型量化膝关节结构在行走过程中对于不同足底支撑的生物力学响应。以外侧楔形鞋垫为例, 利用步态分析获取肌肉模型和有限元模型的输入条件, 通过肌肉模型计算得出的肌肉力进一步定义有限元模型在各个足底支撑作用下的肌肉加载边界条件。有限元仿真结果表明外侧楔形鞋垫减小了内侧半月板和股骨关节软骨处的接触压强。

关键词 有限元; 膝关节; 生物力学; 足底支撑

中图分类号 R318.08

文献标志码 A

doi 10.11966/j.issn.2095-994X.2015.01.01.09

The Biomechanical Responses of Knee Joint to Foot Supports: Computational Simulation of the Lower Limb

LIU Xuan^{1,2}, ZHANG Ming^{1,2}, FAN Yubo³

1.The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China

2.Interdisciplinary Division of Biomedical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

3.School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The primary objective of this study is to establish a comprehensive finite element model of the human knee-ankle-foot to quantify the biomechanical responses of knee structures to various foot supports in gait. Laterally wedged insoles (LWI) were fabricated for interventions. Gait analyses were performed to obtain input information for the muscle model and finite element model. Muscle model was also applied to provide muscle loading boundaries in each foot support condition for the finite element model. The simulation results indicated that LWI diminished the contact pressure at the medial meniscus and femoral cartilage.

Keywords finite element; knee joint; biomechanics; foot support

1 引言

关节炎是一种包括破坏和修复机制的代谢活跃的机能性疾病; 生物化学和力学的因素都有可能触发炎症的

产生^[1]。膝关节在人体负载运动, 例如行走过程中发挥着枢纽的作用, 对于负载传导的力学刺激较之其它关节更为敏感。通过改变足底支撑预防和减缓膝关节炎的发展在近年来作为非侵入式治疗手段引起了人们的重视。

收稿日期: 2015-02-10; 修回日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11272273, 11120101001); 香港大学教育资助委员会基金(PolyU 532611E)

作者简介: 刘璇, 博士后研究员, 研究方向为生物医学工程, 电子信箱 liuxuan_cn@hotmail.com; 张明(通信作者), 教授, 研究方向为生物医学工程, 电子信箱: ming.zhang@polyu.edu.hk

引用格式: 刘璇, 张明, 樊瑜波. 膝关节对于足底支撑的生物力学响应: 人体下肢计算机仿真[J]. 世界复合医学, 2015, 1(1): 47-51.

膝关节炎在膝关节的内侧最容易发生^[2],这是由于地面反作用力在步态的站立相始终指向膝关节的内侧,导致关节内侧承受较大的载荷。外侧楔形鞋垫的原理正是通过垫高外侧足部,改变膝踝足的力线角度以达到减小内侧膝关节负载的目的。尽管如此,对于楔形鞋垫是否有效,科研界仍存在争论。

目前,关于足底支撑对膝关节影响的研究大多还局限于步态分析。通过这种实验手段后期的动力学分析仅能提供合力矩,不能解答载荷在关节内部究竟是如何分布,从而使得人们难以了解关节损伤以及炎症导致的疼痛究竟发生于何处。而有限元分析作为一种十分成熟的工程计算机模拟方法可以预测模型结构中任意元素的应力应变,近年来在探索膝关节的生物力学响应方面也展现出极大的优势^[3]。我们通过现有的足踝有限元模型也已经对足和足部支撑的相互作用有了一定的了解^[4]。在此基础上本文建立了一个包括肌肉模型和三维有限元模型在内的下肢计算生物力学平台,以外侧楔形鞋垫为例,研究在步态站立相的多个时刻膝关节对于足部支撑的响应。

1 方法

1.1 步态分析

我们对一名年龄34岁身高174cm体重70kg的受试者进行步态分析。该受试者无下肢肌骨系统疾病,膝踝足力线角度处于正常范围。三双倾斜角度分别为0, 5, 10°的外侧楔形鞋垫Laterally Wedged Insoles (LWI) 由邵氏硬度A65的高密度EVA材料(英国A.Algeo公司)制备。0°无倾斜角度为对照组,10°为在可接纳的舒适程度范围内的最大倾斜角度,5°为处于两者中间的倾斜角度。实验设备为Vicon运动捕捉系统(英国Vicon公司)和AMTI测力台(美国AMT公司)。受试者分别穿着3双鞋垫以正常步速行走,每双鞋垫分别测试3次,每次行走测试时间为5秒。由步态分析获得的运动学数据以及地面反作用力信息作为肌肉模型和有限元模型的输入条件。



图1 步态分析

Fig. 1 Gait analysis

1.2 计算机仿真

取受试者右腿在非负重状态下的中立位进行核磁共振扫描,所得图像用MIMICS v14(比利时Materialise公司)做几何重建,生成的面模型通过Rapidform XOR3(韩国INUS科技公司)转换成体模型再输入ABAQUS v6.11(美国达索公司)进行有限元建模与分析。鞋垫的几何模型在Rapidform中生成,然后参照步态分析所得运动学数据在ABAQUS中与下肢模型对准。

下肢模型结构(图2左图)包括26块足部骨骼和包裹其外的软组织,胫骨,腓骨,髌骨以及于远端截断的股骨。膝关节结构还包括半月板,股骨和胫骨面的关节软骨,前/后交叉韧带,内/外侧副韧带。鞋垫的有限元模型由六面体单元划分。下肢模型中除了足踝韧带和足底筋膜用非抗压性的桁架单元模拟之外,其它实体均由四面体单元划分。图2右图显示膝关节处的网格划分。模型包含155615个节点。ABAQUS中的自动面对面的接触算法用来定义骨骼面之间以及半月板和软骨之间的相互作用。考虑到关节面的润滑度,设定接触为无摩擦接触。足部和鞋垫的材料特性参照本课题组先前建立的足踝有限元模型设定^[5]。膝关节韧带用超弹性材料来定义,其应力应变关系由文献^[6]获得。膝关节处关节软骨的弹性模量为12MPa,泊松比为0.45^[7]。半月板的弹性模量为59MPa,泊松比为0.49^[8]。

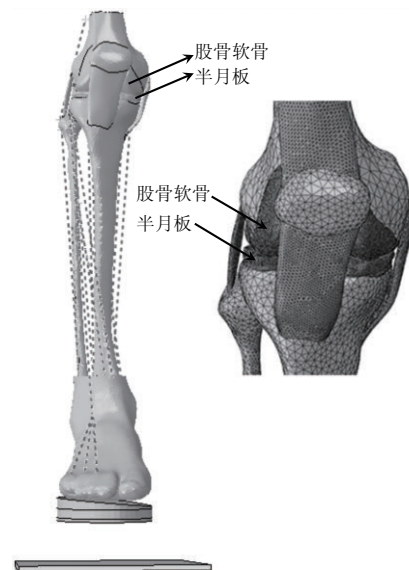


图2 下肢有限元模型

Fig. 2 The finite element model of the lower limb

股骨截断于股骨髁上方约10cm处,其端面完全约束以形成远端边界。通过步态分析测得的地面反力通过地板加载在力作用中心;鞋垫和地板的摩擦系数为0.6^[9]。图3所示为步态分析得到的不同足底支撑下的地面反力作用中心的轨迹。肌肉力在有限元模型中通过ABAQUS连接单元施加,如图2中虚线所示;肌肉在骨骼上的附

着点参考交互式解剖软件（英国Primal Picture公司）。在OpenSim 2.4.0^[10]中建立基于受试者的肌肉模型以计算三双不同角度的鞋垫支撑下的肌肉力；肌肉力计算包括外侧腓肠肌，内侧腓肠肌，股骨肌，比目鱼肌，股二头肌，半膜肌，半腱肌，趾屈肌，腓骨肌和胫骨肌共十组下肢主要肌肉群。对站立相的三个关键时刻地面反力第一峰值 (1st peak)，地面反力谷值 (valley) 以及地面反力第二峰值 (2nd peak)进行有限元分析；各个时刻的运动学，动力学以及肌肉力参数分别输入有限元模型进行计算。

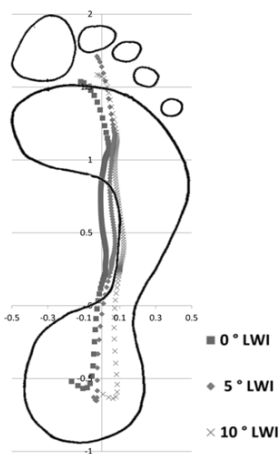


图3 三个外侧楔形鞋垫支撑下地面反力作用中心轨迹

Fig. 3 Ground reaction force center trajectories in three LWI conditions

2 结果

对有限元预测的膝关节在站立相的接触特性进行

分析，比较不同足底支撑作用下的接触压强峰值。站立相地面反力曲线具有双峰特性，其在足跟着地后呈现第一峰值，随足与地面接触面积的增大至站立相中期呈现谷值，至足跟离地足趾蹬地时呈现第二峰值。股骨软骨以及半月板上的接触压强与膝内翻力矩是呈正相关的，因此改变足底支撑导致的接触压强的重新分布可以直接反应膝内翻力矩的变化。图4显示三个外侧楔形鞋垫作用下股骨软骨以及半月板在地面反力第一峰值，谷值，第二峰值时的最大接触压强。可以观察到在各个鞋垫作用下，站立相三个时刻中第二峰值的接触压强大于其它两个时刻的接触压强，与步态测得的该受试者的膝内翻力矩第二峰值高过第一峰值对应。在0°、5°、10° LWI作用下，该受试者的膝内翻力矩第二峰值分别为0.65、0.63、0.61 Nm/kg，第一峰值分别为0.56、0.47、0.45 Nm/kg。以0° LWI为基准，5°和10° LWI在站立相的各个时刻都分别减少了股骨软骨和半月板的最大接触压强；而这一作用在地面反力谷值时刻表现最为显著。股骨软骨在地面反力谷值时的最大接触压强在5° LWI作用下减少了8.9%，在10° LWI作用下减少了22.6%。半月板在地面反力谷值时的最大接触压强在5° LWI减少了10.4%，在10° LWI作用下减少了23.5%。图5为地面反力谷值时刻股骨软骨和半月板表面的接触压强分布云图。在三双不同角度的外侧楔形鞋垫支撑下，股骨软骨和半月板表面的最大接触压强都出现在内侧；这一现象与其它有限元模型^[11]得出的趋势一致，而本文进一步给出了量化的接触压强分布。

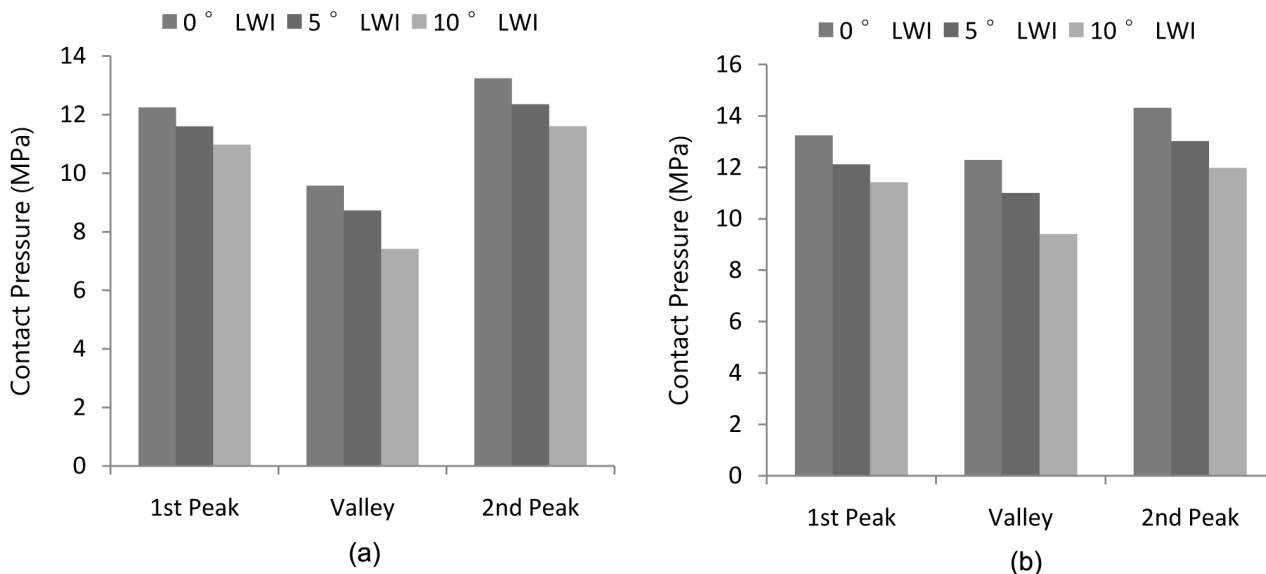


图4 三个外侧楔形鞋垫作用下股骨软骨(a)，半月板(b)在地面反力第一峰值，谷值，第二峰值时的最大接触压强

Fig. 4 Peak contact pressure on femoral cartilage (a) and menisci (b) at ground reaction force 1st peak, valley and 2nd peak in three LWI conditions

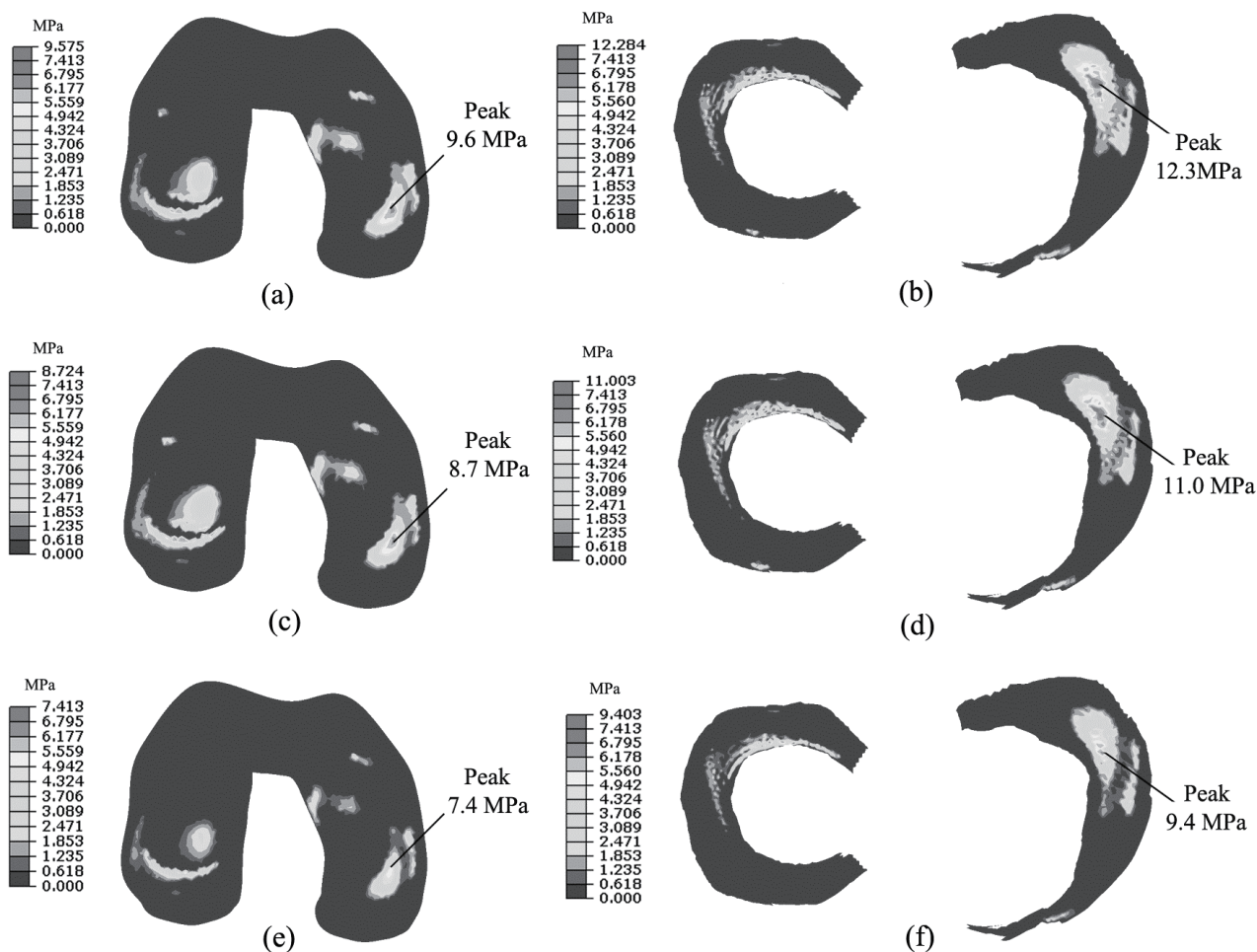


图5 股骨软骨在(a)0°、(c)5°和(e)10° LWI作用下的接触压强分布以及半月板在(b)0°、(d)5°和(f)10° LWI作用下的接触压强分布
Fig. 5 Contact pressure distribution on femur cartilage with (a) 0°, (c) 5° and (e) 10° LWI and contact pressure distribution on menisci with (b) 0°, (d) 5° and (f) 10° LWI.

3 讨论及结论

本模型提取步态站立相的多个时刻进行模拟,同时考虑到膝关节和足踝的复杂几何形状,非线性材料特性,大变形以及足和足底支撑界面的摩擦滑动,作为首例包含膝踝足的下肢整体模型研究膝关节对于足底支撑响应的影响。从文献调研中我们尚未发现外侧楔形鞋垫作用下的肌电数据;而如何将表面肌电信号准确地表征成肌肉力也一直是人体有限元仿真中肌肉力输入的一个难点。本文通过将步态信息输入到肌肉模型进行计算获取了有限元模型的肌肉力参数,这种多个平台的结合为人体有限元建模提供了极大的便利性。

本文的仿真结果表明外侧楔形鞋垫可以对膝关节接触表面的压强进行重新分布。股骨软骨和半月板接触形成的关节面为膝关节承载的主要结构,其载荷传导的改变可加剧或减缓膝关节炎的症状。外侧楔形鞋垫作为一种非侵入性矫正手段可以减轻膝关节内侧的接触压强,从而达到缓解膝关节内侧疼痛的目的。在临床应用上,膝踝足有限元模型可以被用来研究下肢各个关节对不同足底支撑以及矫形器具的响应,从而优化产品的设计。由于有限元模型具备参数化评价以及无创性模拟测试的优势,随着技术的不断进步,其在生物力学领域的应用展现着不可估量的前景。

参考文献 (References)

- [1] Astephen J L, Deluzio K J, Caldwell G E, et al. Biomechanical changes at the hip, knee, and ankle joints during gait are associated with knee osteoarthritis severity [J]. Journal of Orthopaedic Research. 2008, 26(3): 332-341.

- [2] 程晏, 王子彬. 膝关节骨性关节炎步态分析的研究进展 [J]. 中华康复医学杂志, 2013, 28(7): 676-680.
- [3] 郝智秀, 金德闻, 张宇, 等. 步态变化对人体膝关节接触生物力学特性的影响 [J]. 清华大学学报, 2009, 49(5): 39-42.
- [4] 张明, 张德文, 余嘉, 等. 足部三维有限元建模方法及其生物力学应用 [J]. 医用生物力学, 2007, 22(4): 339-344.
- [5] Cheung J T M, Zhang M. Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite element method [J]. Medical Engineering & Physics, 2008, 30(3): 269-277.
- [6] Mesfar W, Shirazi A A. Biomechanics of the knee joint in flexion under various quadriceps forces. Knee [J], 2005, 12(6): 424-434.
- [7] Moglo K E, Shirazi A A. On the coupling between anterior and posterior cruciate ligaments, and knee joint response under anterior femoral drawer in flexion: a finite element study [J]. Clinical Biomechanics, 2003, 18(8): 751-759.
- [8] LeRoux M A, Setton L A, 2002. Experimental and biphasic FEM determinations of the material properties and hydraulic permeability of the meniscus in tension [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2002, 124(3): 315-321.
- [9] Zhang M, Mak A F. In vivo skin frictional properties [J]. Prosthetics and Orthotics International, 1999, 23(2): 135-141.
- [10] 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 Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 54(11): 1940-1950.
- [11] Shim V B, Mithraratne P, Anderson I A, et al. Simulating in-vivo knee kinetics and kinematics of tibio-femoral articulation with a subject-specific finite element model [C] //Dössel O, Schlegel WC., eds. IFMBE Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Munich: Springer, 2009, 25(4): 2315-2318.

美国华人神经科学会信息

美国华人神经科学会 (Chinese American Neurological Association, 以下简称 CANA) 是一个在美国注册的非营利的职业团体, 于 2011 年 4 月在美国夏威夷成立。

在中国改革开放后, 国内莘莘学子来到美国求学。在经过多年的学习和各种经历以后, 有的完成了美国临床神经科医生专业训练, 有些人在神经科学基础研究领域研究获得成效。此时, 大家有意为促进中美神经科学各领域的交流, 同时也为在美国的华人神经科临床和基础研究人员提供一个自己交流的平台, CANA 因而成立。

在夏威夷的成立大会上, 有在美国的临床和基础研究人员 33 人出席。同时也有从中国大陆神经内科学者 27 人参加。在成立大会上, 分别由美国神经科医生和国内神经科医生进行了首次的学术交流, 取得了良好的结果。

CANA 现有会员 80 余人, 会员资格包括永久会员 (permanent member), 普通会员 (regular member), 学生会员 (junior member), 和关联会员 (associate member)。会员中有在美国神经科学的学术和临床开始崭露头角的学人; 有临床学科和专科规培训练的主任 (program director); 有个人执业和身手不凡的专科医生; 有刚完成美国神经科专科训练和正在接受神经内科学科训练的新人; 国内的关联会员中有许多神经科一线的领军人物和成长新秀。

CANA 在积极推进会员之间的相互了解和增进交流的同时也在酝酿和协助下一步具体项目和行动来促进中美神经科学学术交流以及协助国内神经内科学同行与世界上神经科发展的动态同步, 与国内同行们一起互动和交流。CANA 期待在为祖国的神经内科学在与国际接轨的科学发展中起到一定的作用和作出自己的贡献。

CANA 在每年的美国神经病学 (American Academy of Neurology) 会议期间举行年会; 同时也不定期地在其他专科神经病学会议中聚会。CANA 的现任会长是王正 (伊利诺伊大学), 副会长是喻文贵 (加州大学), 秘书长是罗进军 (天普大学)。CANA 网站是 <http://www.cana-us.org/board-members/>

(美国华人神经科学会秘书长罗进军供稿)