

膝关节骨性关节炎步态分析特征及3D矫形鞋垫设计应用

吴海贺, 魏宝刚, 王永祥, 包呼日查, 马秉贤, 齐岩松*, 徐永胜*

内蒙古自治区人民医院骨关节科(运动医学中心), 呼和浩特 010017

摘要 概述了2种步态分析实验系统、实验原理和KOA患者下肢三维步态的改变;由于下肢生物力学的复杂性和研究技术的局限性,3D矫形鞋垫设计目前仍处于初级阶段,产品的治疗效果尚无统一意见并且未大量生产使用,因此对3D矫形鞋垫在KOA中的应用原理及制作过程进行深入探讨,明确KOA患者膝关节周围动力和静力结构变化,将其应用于3D矫形鞋垫的设计和生,为早期KOA保守治疗提供重要解决方案,既能够患者满足舒适性和功能性的双重需求,又能使制造周期和成本显著降低。

关键词 膝关节骨性关节炎;步态分析;矫形鞋垫

随着世界人口老龄化的加剧,膝关节骨性关节炎(knee osteoarthritis, KOA)的发病率逐渐增高,给家庭和社会带来沉重的负担和巨大的经济压力, KOA发病原因既有生物力学方面的因素^[1]也有外源性等因素,75岁以上患者发病率超过80%,严重影响生活质量,甚至丧失活动能力。随着人们对生活质量要求的不断提升及手术技术发展,全膝关节置换术已经成为晚期KOA患者的常规治疗方案,但是术后容易出现多种并发症,严重影响临床疗效。既往研究表明人体在直立行走等活动过程中,

下肢关节运动生物力学的平衡是影响人体姿势平衡、下肢步态以及相关疾病的发生与发展的重要因素。而目前临床兴起步态分析(gait analysis, GA)技术是利用三维运动捕捉系统,研究步态周期中相关规律,近来在下肢常见疾病诊疗、运动功能评价及康复等方面应用广泛,其能够阐明步态周期中相关变化的关键位置及其影响因素^[2]。既往研究表明KOA的进展与下肢步态改变有关^[3],特别是与时空参数有关^[4],GA能够帮助明确疾病的本质,有利于KOA的早期治疗与延缓疾病进程。此外,随着3D

收稿日期:2021-03-21;修回日期:2021-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(81560374, 82172444);内蒙古自治区科技计划项目(201802154, 2021GG0127);内蒙古自治区人民医院院内基金项目(2020YN24)

作者简介:吴海贺,主治医师,研究方向为骨关节临床与基础,电子信箱:gkwuhaihe@163.com;齐岩松(共同通信作者),主治医师,助理研究员,研究方向为运动医学临床与基础,电子信箱:malaqinfu@126.com;徐永胜(通信作者),主任医师,研究方向为骨关节、运动医学临床与基础,电子信箱:dlxyf@163.com

引用格式:吴海贺, 魏宝刚, 王永祥, 等. 膝关节骨性关节炎步态分析特征及3D矫形鞋垫设计应用[J]. 科技导报, 2021, 39(22): 49-56; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.22.006

打印技术在临床的广泛应用,可以为骨科疾病的诊断和保守治疗提供新方向,具有效率高、操作简单等优势,在损伤、修复方面具有天然优势。基于人体生物力学的3D打印矫形鞋垫能够有效缓冲人体活动运动时足底负重的压力,增强足稳定性,维持下肢平衡,纠正步态异常^[5-6]。因此,基于KOA患者GA测量方式及特点,分析3D矫形鞋垫在KOA中作用以及生物力学原理,为3D矫形鞋垫在临床应用及发展提供参考。

1 两种GA系统及原理

GA是量化分析膝关节内部运动生物力学变化的有效方法,目前GA可基于可穿戴惯性传感器和传统光学分析系统2种方式进行。KOA发病后患者膝关节周围的动力与静力系统失去平衡,下肢力线异常,继而导致步态周期中相关参数的变化。KOA步态中的姿势和运动障碍可能与下肢运动生物力学改变和神经控制的适应性变化有关,可以通过步态起始作为评估的关键。整个步态周期中步态起始是一项高度协调的任务,也是最重要的部分,尽管此时步态处于稳定状态,但是下肢姿势和运动的耦合的复杂阶段^[7]。

既往三维GA系统是以多个高速红外线摄影机为基础的三维运动分析系统,通过捕捉贴敷于人体解剖标志点的反射光标,并经过系统的光电转换功能计算出人体解剖标记点的三维空间坐标信息,从而获得物体的空间三维坐标,通过系统算法获得下肢活动角度和速度,利用逆向动力学方法可计算出动力学参数。设备虽然提供了详细的运动及动力学数据,但在测量时需要使用高速红外线摄像机捕捉放置在预定解剖位置的反射光标和高度精确校准的实验环境,对科研人员的专业性和步态实验室的要求非常高,并且在门诊并不可行(图1、图2^[8])。

目前可穿戴惯性传感器的出现为传统的光学GA系统提供了一种可行的替代方案(图3)^[9],可佩戴惯性传感器或惯性测量单元使用1个或多个单独的传感器(加速度计、陀螺仪、磁力计)来测量运

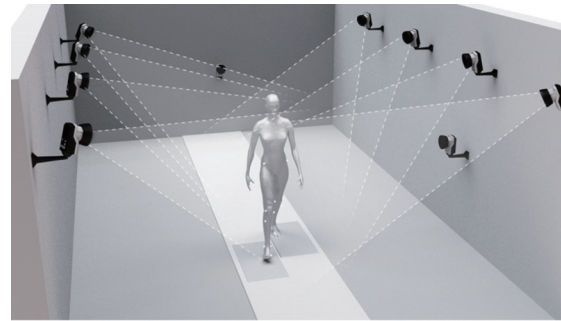


图1 传统步态分析实验室模式
(图片来源:瑞典Qulisy公司)

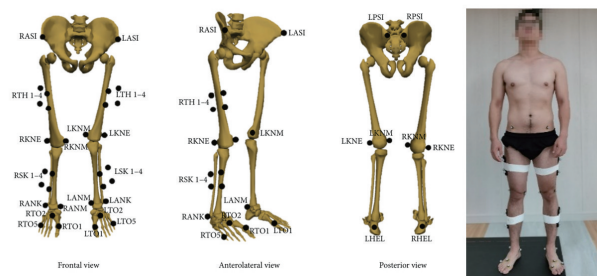


图2 传统步态分析高速高清摄像头捕捉光标标记点

动(线性加速度、角速度)^[10-11]。通过将惯性传感器连接到身体的各个部位,可以获得与光学系统相似的有效、可靠的各种生物力学结果^[12]。



图3 惯性便携式传感器模式图及运动坐标模拟

此外,惯性传感器数据采集不受传统GA实验室的限制。因此,利用惯性传感器研究骨关节炎(osteoarthritis, OA)生物力学是目前的发展方向之一。既往研究中也阐述了多种不同的惯性传感器系统,Tadano等^[10]使用H-Gait系统测量了髌关节、膝关节和踝关节在矢状面上的运动学差异;Rahman等^[13]使用Gait Smart系统测量了大腿和小腿矢状面和冠状面、膝关节矢状面运动学及时间步态参

数;RehaGait系统能够可靠地评估年轻和年长健康受试者行走期间的下肢运动学^[11]。惯性传感器系统在KOA患者测量中的成功应用进一步推动该系统在临床研究中的使用。不同惯性传感器系统放置在人体下肢不同位置,不同系统中人体模型的建立及数据处理方式不尽相同。但既往结果表明,在临床的日常应用中,均适用于评估KOA患者的步态(时空参数和矢状面运动学)。整体来说,三维GA主要包括运动学、动力学及下肢表面肌电3个方面,但是表面肌电是通过监测下肢运动时神经肌肉系统活动所产生的生物电信号,其对实验室设备限制及对专业性要求极高,尚未广泛开展。

2 KOA患者GA运动学和动力学参数改变

KOA患者运动学和动力学参数的主要变化出现在人体冠状面,如髌膝关节内收、外展角度的变化和膝关节内收力矩(knee adduction moment, KAM)的改变。随着年龄增大,下肢步态时空参数的变化有步幅缩短和步频增加,以及矢状面髌、踝关节运动学和动力学的改变。既往运动学研究表明KOA患者步速、步长、步频均明显降低,运动中受累侧膝关节活动度降低,并与KOA严重程度相关;KOA患者步态周期中支撑相时间与摆动相时间的比例发生改变,支撑相占步态周期的比例显著增加;步态周期中足跟触地阶段时间和前足离地阶段时间比例明显降低,而前足触地阶段、全足支撑阶段时间比例显著增高^[14]。KOA患者患膝活动角度会减小,包括足跟着地期伸膝角度、支撑期最大屈膝角度和支撑期最大伸膝角度均减小^[15-16]。

年龄、机械负荷、关节结构变化和KOA发展之间的联系需要进一步研究^[12],特别是冠状面生物力学,其与KOA的发生、发展密切相关,矢状面的下肢步态变化主要与年龄相关。膝关节内侧间室OA的发展被认为是重复负荷的结果,导致半月板疲劳失效或损伤,随后内侧关节软骨丢失。KOA的动力学研究包括:(1)地面反作用力(ground reaction force, GRF),正常步行时GRF呈双波峰,研究表明,

GRF改变受体重和步行速度影响,KOA患者可以通过减慢步速,降低GRF,从而减轻膝关节负荷^[14,17]。KOA患者GRF第一峰值高于健康人群,而GRF第二峰值却低于健康人群;GRF的最大负荷正常组要比KOA组高;(2)剪应力,正常步行时前、后剪应力表现为反向尖峰图形;(3)下肢力矩,即力与关节活动范围内不同角度的力臂相乘,受关节稳定性、肌力和运动方向等多重因素影响。

而KAM可以反映膝关节内侧间室应力负荷改变情况,KAM由GRF和膝关节中心到GRF向量间力臂共同决定,是KOA研究中可靠的监测参数。中度至重度内侧间室KOA患者第一峰值KAM明显增加,这与膝关节内侧间室应力增加有关^[18-19],而且与疾病进展和严重程度成正相关^[20-21]。既往表明早期KOA患者KAM的增加是由于膝关节内收角度的显著增加导致的,而不是GRF。晚期KOA患者KAM的增加与膝关节的形态学变化有关,内外侧半月板及软骨磨损,导致骨质丢失和软骨下骨的继发变化^[22]。膝关节形态学的改变会导致下肢在行走时KAM更加增高。由于膝关节软骨体积降低,导致的膝关节负重区域软骨磨损,使得膝关节内侧(相对于外侧)胫骨面积磨损大于外侧^[23],内侧间室软骨修复速度无法平衡软骨磨损的速度。

此外,KAM的变化与躯干整体运动有关,因此躯干肌肉组织活动的异常改变可能导致KAM增加,加重KOA的发生与发展。臀周围肌肉组织肌力下降可能会导致骨盆位置相对下降^[24],增加KAM杠杆的力臂,导致KAM增大。此外,由下肢内侧-外侧肌肉肌力的不平衡(如腓绳肌或腓肠肌)可能会影响膝关节冠状面的活动^[25],进而影响KAM。

3 3D矫形鞋垫在KOA中应用的原理与机制

矫形鞋垫在英国是KOA指南推荐的非药物保守治疗选择之一,其中外侧楔形鞋垫(lateral wedges insole, LWI)是基于促使下肢力线外翻,减轻膝关节内侧间室的应力的原理而设计生产的,其结构

为从脚跟到第五跖骨头近端的外侧边缘。其他干预措施有减震鞋垫和不同类型的鞋以发挥对膝关节应力缓冲作用^[26]。所有干预措施都是通过减轻KOA的症状来改善功能,并减缓疾病的进展^[27]。

既往研究主要通过观察对膝关节疼痛缓解、功能改善和KAM的变化来研究LWI的有效性及其特点。虽然LWI在改善患者WOMAC疼痛量表上的结果并不一致,但既往研究均显示患者止痛药物使用明显减少,而疼痛评分保持不变。可能是由于LWI减轻了患者膝关节的疼痛,导致止痛药物摄入量减少,活动水平升高,从而导致与基线相同的WOMAC疼痛评分,但患者活动水平明显增高^[28]。

LWI作为一种非手术方法,在临床上用于治疗KOA,因为它可以平衡分配膝关节的轴向应力负荷,可以显著增加股骨胫骨角,即减少膝关节内翻畸形^[29]。相关的生物力学研究表明,LWI可以影响膝关节旋转、髌关节内收、踝关节内翻力矩以及促进股内侧肌和臀中肌活动增加,从而纠正步态,缓解疼痛^[30]。穿戴LWI的患者在正常行走及上下楼梯时,均能缓解膝关节应力,能够促使膝关节应力中心横向向外移动产生更垂直于地面反作用力,这导致膝关节地面反作用力臂减小,KAM降低^[31],从运动生物力学上改善KOA进展。基于下肢运动生物力学的研究,LWI楔入的越高,KAM还原越大,越接近生理水平,但是过高的外侧楔入高度LWI会导致膝关节的疼痛或不适^[32-33],总体来说5°楔入是KAM恢复和患者穿戴适应之间的最优选择。此外全足长LWI比仅后足LWI对KAM影响更为更显著,Hinman研究发现,整足外侧楔入的设计是KAM有效恢复生理水平的关键,因为有利于膝关节轴向应力中心的横向向外移动;此外,后足LWI只影响30%~40%的步态周期,整体全长楔入更有效,因此建议患者使用全长LWI^[34]。

早期KOA患者在步态初始阶段采用不同的姿势策略来适应下肢生物力学的改变,LWI在步态起始的执行阶段表现出了良好效果,在步态起始阶段的预期姿势调整期,能够使下肢压力中心横向移位更长、更快,可以帮助患者达到快速行走稳定与动态平衡的行走状态。此外LWI可以促进跟骨外翻

和行走时下肢的横向压力中心向外侧移位。既往研究表明,LWI生物力学有效性在使用1年后仍然存在,这可能是KOA患者穿戴LWI后改善了步态起始期情况,使下肢压力中心横向移动轨迹得以改善平衡^[7]。一项纵向研究表明,KAM每增加1个单位($N \cdot m \cdot kg^{-1}$),膝关节内侧间室疾病进展的风险就会增加6.46倍^[20]。此外在患者1年后再没有穿戴LWI的情况下进行随访,发现患者已经形成了对其特定步态的适应,因此表明LWI使患者改善步态的一种代偿性机械适应,在步态起始和行走时与平衡训练计划结合,可以改变下肢步态、促进膝关节运动生物力学的恢复,在长期减缓疾病进展中发挥重要作用^[35-36]。

4 基于GA结果3D矫形鞋垫制作过程与使用

近年来,随着Mimics、Geomagic Studio、ABAQUS、Qualisys、FreeStep、Footscan、Kistler、3D打印等计算机软件与设备在临床研究中的应用,3D矫形鞋垫对治疗早期KOA的应用也越来越广泛,上海交通大学医学院附属第九人民医院已将针对下肢早期OA患者治疗康复用3D打印矫形鞋垫进行了临床推广应用,近期效果比较满意,可有效改变患者的下肢力线及促进正常步态的恢复。

根据不同患者GA的情况要定制不同的矫形鞋垫,主要为3个步骤:(1)采集步态周期中足部动/静态数据(F-Scan压力传感、Shimmer3 IMU系统和Freestep系统等),足底压力分布可以反映人体的下肢力线,通过足底压力不同分区的分布、足弓状态、力度中心轨迹、峰值压力区域等数据为鞋垫的设计制作提供客观的理论依据(图4^[37]、图5)。在行走试验中,使用F-Scan压力传感鞋垫收集足底压力信息,Shimmer3 IMU系统记录下肢加速度和角度旋转。Freestep系统是最新一代用于足底压力、稳定性和生物力学检查的软件,它集合了所有必备的功能来满足对患者的临床检查,推荐其在临床广泛应用。(2)通过足底扫描仪,取代传统的取模方式,生成三维的足型数据,通过超薄的橡胶垫

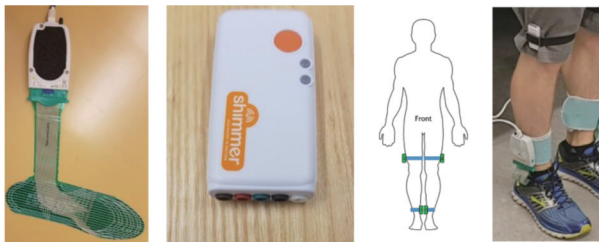
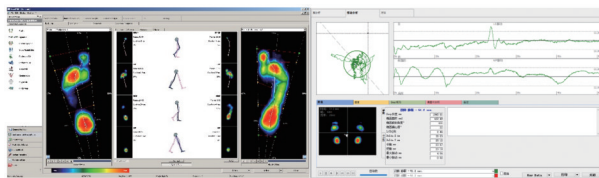
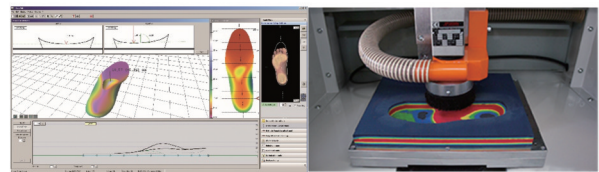


图4 F-Scan压力传感加Shimmer3 IMU系统



(a) 静态足底压力分析

(b) 动态足底压力分析



(c) CAD建模

(d) 数字控制机床加工

图5 Freestep系统

支撑足部,能够完美贴合足底,使其更符合人体解剖学。继续利用鞋垫计算机设计软件,将采集到的足压数据通过软件内置的足压分析模块CAD-CAM设计加工软件进行初步设计处理,实时渲染3D建模,再将初步处理过的足压数据进行最终的人工修改设计定型。(3) 利用加工机床即数控雕刻机床及3D鞋垫打印机,打印出不同材质的个性化矫形鞋垫(图6)^[38]。



图6 个性化外侧矫形鞋垫治疗内侧间室KOA

3D矫形鞋垫不仅具有普通鞋垫的缓冲压力减震、防止足部滑动、支撑足弓以及改善足部功能的

作用,还可以通过矫正和改善足底压力分布,对相关的足部疾病进行保守治疗,改善下肢步态及运动生物力学^[20-21],从而达到预防KOA的发生与发展。3D打印矫形鞋垫为三维立体结构,不同于普通鞋垫,因此需要一定的适应期。通常建议穿着矫形鞋垫行走1~2周进行适应。若足部不适明显,可在开始使用定制时每天试穿行走1~2 h,后期逐渐增加每日使用时间以度过适应期。此外依据定制选择合适的鞋匹配鞋垫也非常重要。

5 结论

GA对于KOA患者早期预防、诊断、治疗、康复及步态纠正均具有重要意义,不同疾病时期患者GA的时空学及动力学参数会发生不同特征性改变,是今后KOA发展的重要方向之一,目前对于表面肌电的研究尚不深入,今后对于此方面详细的研究可能对疾病有新的认识。目前基于GA的LWI对KOA有效性的研究仍然存在分歧,虽然英国推荐使用矫形鞋垫,但是欧洲抗风湿病联盟认为没有足够证据表明其临床效果,且可能会增加患者的痛苦,因此并不推荐临床使用。

患有膝关节内侧KOA的患者KAM明显较高,且冠状面髌关节和膝关节运动学改变,KAM的升高与膝关节形态明显相关^[39]。既往的相关研究认为LWI可以改变KOA的膝关节内收力矩、缓解疼痛和改善功能,整体来说,LWI能够更加合理地分配膝关节应力负荷,可能会影响疾病的长期进展,但其对膝关节疼痛和功能结果的影响仍有争议。目前临床上能够取得良好效果的LWI建议具备全长、5°倾斜角、减震功能和足弓支撑,特别是K-L 2级的KOA患者使用疗效更佳。个性化LWI在缓解膝关节疼痛、恢复膝关节功能和下肢生物力学方面更为有效,既往研究认为基于GA个性化定制LWI会减少其对自身感觉的不良影响,同时更有利于KAM的恢复^[32,40]。我们仍需要就LWI对KOA进展的长期影响进行进一步研究,进而得到更可靠的临床与实验学结论。

参考文献(References)

- [1] Ung A, Ssn B, Mh C, et al. Management of early and late presenting tibial stress fracture with advanced osteoarthritis of the knee: A dilemma among arthroplasty surgeons in developing countries[J]. *The Knee*, 2021, 29: 95–100.
- [2] 邢丹, 徐俊杰, 黄文汉. 步态图评估膝关节运动功能的专家共识(2020年版)[J]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2020, 14(6): 651–656.
- [3] Andriacchi T P, Mündermann A. The role of ambulatory mechanics in the initiation and progression of knee osteoarthritis[J]. *Current Opinion in Rheumatology*, 2006, 18: 514–518.
- [4] Mills K, Hunt M A, Ferber R. Biomechanical deviations during level walking associated with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis[J]. *Arthritis Care and Research*, 2013, 65(10): 1643–1665.
- [5] 韩亚丽, 王兴松. 人体行走下肢生物力学研究[J]. *中国科学技术科学*, 2011, 41(5): 592–601.
- [6] Felson D T, Parkes M, Carter S, et al. The efficacy of a lateral wedge insole for painful medial knee osteoarthritis after prescreening: A randomized clinical trial[J]. *Arthritis & Rheumatology*, 2019, 71: 908–915.
- [7] Eea B, Mas C, Aaj D, et al. Gait initiation and lateral wedge insole for individuals with early knee osteoarthritis[J]. *Clinical Biomechanics*, 2020(80): 105163.
- [8] Ulbricht H, Hou M, Wang X, et al. The effect of correction algorithms on knee kinematics and kinetics during gait of patients with knee osteoarthritis[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2020(6): 1–8.
- [9] Ismailidis P, Nüesch C, Kaufmann M, et al. Measuring gait kinematics in patients with severe hip osteoarthritis using wearable sensors[J]. *Gait Posture*, 2020, 81: 49–55.
- [10] Tadano S, Takeda R, Sasaki K, et al. Gait characterization for osteoarthritis patients using wearable gait sensors (H-Gait systems) [J]. *Journal of Biomechanics*, 2016, 49: 684–690.
- [11] Ismailidis P, Hegglin L, Egloff C, et al. Side to side kinematic gait differences within patients and spatiotemporal and kinematic gait differences between patients with severe knee osteoarthritis and controls measured with inertial sensors[J]. *Gait Posture*, 2021, 84: 24–30.
- [12] Ismailidis P, Egloff C, Hegglin L, et al. Kinematic changes in patients with severe knee osteoarthritis are a result of reduced walking speed rather than disease severity[J]. *Gait Posture*, 2020, 79: 256–261.
- [13] Rahman J, Tang Q, Monda M, et al. Gait assessment as a functional outcome measure in total knee arthroplasty: A cross-sectional study[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2015, 16(1): 1–9.
- [14] Chen F, Cui X, Zhao Z, et al. Gait Acquisition and analysis system for osteoarthritis based on hybrid prediction model[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2020, 85: 101782.
- [15] Fu H Y. Gait comparison between normal young people and knee osteoarthritis patients[J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2011(22): 4115–4118.
- [16] Mündermann A, Dyrby C O, Andriacchi T P. Secondary gait changes in patients with medial compartment knee osteoarthritis: Increased load at the ankle, knee, and hip during walking[J]. *Arthritis & Rheumatism*, 2005(9): 2835–2844.
- [17] 程晏, 王予彬. 膝关节骨性关节炎步态分析的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2013, 28(7): 676–680.
- [18] Farrokhi S, Meholic B, Chuang W N, et al. Altered frontal and transverse plane tibiofemoral kinematics and patellofemoral malalignments during downhill gait in patients with mixed knee osteoarthritis[J]. *Journal of Biomechanics*, 2015, 48(10): 1707–1712.
- [19] Landry S C, Mckean K A, Hubley-Kozey C L, et al. Knee biomechanics of moderate OA patients measured during gait at a self-selected and fast walking speed[J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(8): 1754–1761.
- [20] Miyazaki T. Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis[J]. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 2002, 61(7): 617–622.
- [21] Foroughi N, Smith R, Vanwanseele B. The association of external knee adduction moment with biomechanical variables in osteoarthritis: A systematic review[J]. *Knee*, 2009, 16(5): 303–309.
- [22] Felson D T, Niu J, Gross K D, et al. Valgus malalignment is a risk factor for lateral knee osteoarthritis incidence and progression: Findings from the Multicenter Osteoarthritis Study and the Osteoarthritis Initiative[J]. *Arthritis & Rheumatology*, 2013, 65(2): 355–362.
- [23] Creaby M W, Wang Y, Bennell K L, et al. Dynamic knee loading is related to cartilage defects and tibial plateau bone area in medial knee osteoarthritis[J]. *Osteoar-*

- thritis Cartilage, 2010, 18(11): 1380–1385.
- [24] Simic M, Hunt M A, Bennell K L, et al. Trunk lean gait modification and knee joint load in people with medial knee osteoarthritis: The effect of varying trunk lean angles[J]. *Arthritis Care & Research*, 2012, 64(10): 1545–1553.
- [25] Padua D A, Bell D R, Clark M A. Neuromuscular characteristics of individuals displaying excessive medial knee Displacement[J]. *Journal of Athletic Training*, 2012, 47(5): 525–536.
- [26] Gardner L I, Dziados J E, Jones B H, et al. Prevention of lower extremity stress fractures: A controlled trial of a shock absorbent insole[J]. *American Journal of Public Health*, 1988, 78(12), 1563–1567.
- [27] Reeves N D, Bowling F L. Conservative biomechanical strategies for knee osteoarthritis[J]. *Nature Reviews Rheumatology*, 2011, 7(2): 113–122.
- [28] Hatem M R, Mirfeizi Z, Sahebari M, et al. Superiority of laterally elevated wedged insoles to neutrally wedged insoles in medial knee osteoarthritis symptom relief[J]. *International Journal of Rheumatic Diseases*, 2014, 17(1): 84–88.
- [29] Ishii Y, Deie M, Fujita N, et al. Effects of lateral wedge insole application on medial compartment knee osteoarthritis severity evaluated by ultrasound[J]. *Knee*, 2017, 24: 1408–1413.
- [30] Lack S, Barton C, Woledge R, et al. The immediate effects of foot orthoses on hip and knee kinematics and muscle activity during a functional step-up task in individuals with patellofemoral pain[J]. *Clinical Biomechanics*, 2014, 29(9): 1056–1062.
- [31] Hinman R S, Bowles K A, Metcalf B B, et al. Lateral wedge insoles for medial knee osteoarthritis: Effects on lower limb frontal plane biomechanics[J]. *Clinical Biomechanics*, 2012, 27(1): 27–33.
- [32] Allan R, Woodburn J, Telfer S, et al. Knee joint kinetics in response to multiple three-dimensional printed, customised foot orthoses for the treatment of medial compartment knee osteoarthritis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine*, 2017, 231(6): 487.
- [33] Kerrigan D C, Lelas J L, Goggins J, et al. Effectiveness of a lateral-wedge insole on knee varus torque in patients with knee osteoarthritis[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2002, 83: 889–893.
- [34] Hinman R S, Bowles K A, Payne C, et al. Effect of length on laterally-wedged insoles in knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Care & Research*, 2010, 59(1): 144–147.
- [35] Hsu W C, Jhong Y C, Chen H L, et al. Immediate and long-term efficacy of laterally-wedged insoles on persons with bilateral medial knee osteoarthritis during walking[J]. *Biomedical Engineering Online*, 2015(14): 43.
- [36] 曹萍, 吴小高. 3D打印技术在矫形鞋垫中的应用进展 [J]. *中国康复理论与实践*, 2015, 21(7): 753–756.
- [37] Pardoel S, Shalin G, Nantel J, et al. Early detection of freezing of gait during walking using inertial measurement unit and plantar pressure distribution data[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(6): 2246.
- [38] Raaij T, Reijman M, Brouwer R, et al. Medial knee osteoarthritis treated by insoles or braces: A randomized trial[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2010, 468(7): 1926–1932.
- [39] Duffell L D, Jordan S J, Cobb J P, et al. Gait adaptations with aging in healthy participants and people with knee-joint osteoarthritis[J]. *Gait & Posture*, 2017, 57: 246–251.
- [40] Skou S T, Hojgaard L, Simonsen O H. Customized foot insoles have a positive effect on pain, function, and quality of life in patients with medial knee osteoarthritis[J]. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 2013, 103(1): 50–55.

Application of orthotic devices in the knee osteoarthritis and its effect on lower limb gait

WU Haihe, WEI Baogang, WANG Yongxiang, BAO Huricha, MA Bingxian, QI Yansong*, XU Yongsheng*

Department of Orthopedics(Sports Medicine Center), Inner Mongolia People's Hospital, Hohhot 010017, China

Abstract The lower limb gait analysis is an effective method to quantitatively analyze the biomechanical changes of the internal motion of the knee joint, as well as an effective way to study the occurrence, the development and the intervention of the knee osteoarthritis (KOA). Two kinds of gait analysis experimental systems and their principles are reviewed, as well as the changes of the KOA patients' 3D lower limb gait. Due to the complexity of the lower limb biomechanics and the limitations of the research technology, the technique of the 3D orthopedic insoles is still in the preliminary stage, and there is no consensus with respect to the therapeutic effect of the products, and they have not been mass-produced and used. Therefore, the application principle and the manufacture process of the 3D orthopaedic insoles in the KOA are emphatically discussed. The dynamic and static structures and the changes around the knee joint of patients with the KOA, as being widely used in the design and the production of the 3D orthopaedic insoles, provide an important solution for the early conservative treatment of the KOA. And it can not only meet the dual requirements of comfort and functionality for patients, but also significantly reduce the manufacturing cycle and cost.

Keywords knee osteoarthritis; gait analysis; orthotic devices ●



(责任编辑 傅雪)