

文章编号:1004-7220(2022)01-0045-07

3D 打印下肢不等长补高鞋垫的拓扑结构和生物力学研究

邓 迁¹, 许苑晶², 赵 康³, 王文豪¹, 魏浩馨⁴, 郑 坤⁴, 王金武^{1,2,5}, 戴尅戎⁵

(1. 西南交通大学 医学院, 成都 611756; 2. 上海交通大学 生物医学工程学院, 上海 200030; 3. 上海数巧信息科技有限公司, 上海 200131; 4. 潍坊医学院 康复医学院, 山东 潍坊 261053; 5. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 骨科, 上海市骨科内植物重点实验室, 上海 200011)

摘要:目的 研究一种新型 3D 打印下肢不等长 (leg length discrepancy, LLD) 补高鞋垫的拓扑结构及其对下肢生物力学的影响。方法 通过人工变密度法的固体各向同性惩罚微结构模型对鞋垫中后部进行拓扑结构优化, 根据鞋垫受力区域分块进行力的加载和边界条件的设置, 采用选择性激光烧结方式打印热塑性聚氨酯橡胶 (thermoplastic polyurethanes, TPU) 补高鞋垫。将该鞋垫应用于 9 例 LLD 患者中, 运用视觉模拟评分法 (visual analogue scale, VAS) 和 Maryland 足部功能评分表比较患者使用鞋垫前后的疼痛及足部功能变化, 并通过三维步态分析双下肢步态时空参数和垂直地面反作用力 (vertical ground reaction force, vGRF)。结果 患者穿戴 3D 打印补高鞋垫后, VAS 评分降低, Maryland 足部功能评分增加, 双下肢 vGRF 降低, 步频、支撑相和摆动相的双下肢差距缩小。结论 拓扑优化后的 3D 打印鞋垫可提高双下肢运动节律的协调性, 减缓地面冲击力, 缓解疼痛和改善足部功能, 可为临床上矫正 LLD 提供一种有效的个性化补高鞋垫矫正方案。

关键词: 3D 打印; 补高鞋垫; 下肢不等长; 拓扑优化; 步态分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.01.007

Topological Structure and Biomechanics of Three-Dimensional Printed Height Increasing Insoles for Leg Length Discrepancy

DENG Qian¹, XU Yuanjing², ZHAO Kang³, WANG Wenhao¹, WEI Haoxin⁴, ZHENG Kun⁴, WANG Jinwu^{1,2,5}, DAI Kerong⁵

(1. College of Medicine, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai Shuqiao Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200131, China; 4. School of Rehabilitation Medicine, Weifang Medical University, Weifang 261053, Shandong, China; 5. Shanghai Key Laboratory of Orthopaedic Implants, Department of Orthopaedic Surgery, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

收稿日期: 2021-02-17; 修回日期: 2021-04-15

基金项目: 国家科技部重点研发计划项目 (2018YFC2002300, 2018YFC2001300, 2018YFB1107000), 上海市科委项目 (19441917500, 19441908700), 上海交通大学医学院地高大双百人计划 (20152224), 上海交通大学医学院转化医学创新基金 (TM201613/TM201915), 上海交通大学医学院附属第九人民医院临床研究型 MDT 项目 (201914)

通信作者: 王金武, 教授, 博士生导师, E-mail: wangjw-team@shsmu.edu.cn

Abstract: Objective To study topological structure of a new type of three-dimensional (3D) printed height increasing insoles for leg length discrepancy (LLD) and its effect on biomechanics of lower limbs. **Methods** Topological structure for middle and rear part of the insole was optimized by solid isotropic microstructures with penalization (SIMP), the force was loaded and the boundary conditions were set according to force area of the insole, and the height increasing insole with thermoplastic polyurethanes (TPU) materials was printed by selected laser sintering (SLS). The insoles were used in 9 patients with LLD, visual analogue scale (VAS) and Maryland foot function scores were used to compare pain and foot function changes of patients before and after using the insole, and the 3D gait analysis system was used to compare spatiotemporal parameters and vertical ground reaction force (vGRF) of both lower limbs. **Results** After the patient wore 3D printed insole, VAS scores decreased, Maryland foot function scores increased, vGRF of both lower limbs decreased, and the difference of cadence, stance phase and swing phase in both lower limbs decreased. **Conclusions** The 3D printed height increasing insole after topology optimization can improve coordination of lower limb movement, reduce ground impact, relieve pain and improve foot function, thus providing an effective personalized orthopedic plan for LLD treatment in clinic.

Key words: three-dimensional (3D) printing; height increasing insole; leg length discrepancy (LLD); topology optimization; gait analysis

作为矫形外科一种常见疾病,下肢不等长(leg length discrepancy, LLD)是指人体下肢长度不一致。LLD可造成人体下肢力线异常,通过脊柱侧弯、骨盆倾斜等进行功能代偿,可引发下背痛、行走困难、关节炎等问题^[1-5]。分类上常根据双下肢间差异确定LLD类型:轻度LLD(差异小于3 cm)、中度LLD(差异3~6 cm)和重度LLD(差异大于6 cm)^[6]。临床上针对双侧肢体长度差小于3 cm的轻度LLD,多采用矫形鞋垫进行治疗,通常在下肢较短侧使用鞋垫补高,但有研究认为这种方法的临床效果不太理想^[7]。

人的脚型存在较大差异,传统鞋垫很难与足部完全贴合,而将3D打印技术应用在矫形鞋垫的制作中,可根据患者真实情况进行个性化设计。目前3D打印鞋垫常为不同材料堆积的实心空间鞋垫,透气性差,材料浪费率高,增加打印成本和患者治疗费用;鞋垫质量较大,且鞋垫各区域硬度大,力学性能较差,无法满足人体在不同活动时的受力需求,舒适性差。为解决以上问题,本文对鞋垫进行拓扑结构优化。拓扑结构是3D打印设计优化的重要方面,从本质上讲,拓扑结构优化关于构件“有”与“无”的分析,常用的拓扑优化模型化方法包括微结构和宏观结构描述的拓扑优化方法。

本文采用基于人工变密度法的固体各向同性惩罚微结构(solid isotropic microstructures with

penalization, SIMP)模型的拓扑优化方法,假定单元密度和材料物理属性存在某种对应,使用连续变量的密度函数表征这种对应,使离散问题连续化;根据足部在不同运动形式中的受力情况,设计鞋垫不同的力学加载区域;最后采用该优化设计方案治疗LLD患者,观察其疗效及对下肢生物力学的影响。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选取上海交通大学医学院附属第九人民医院骨科收治的9例LLD患者,其中男性7名,女性2名,年龄(33.78±23.62)岁,身高(162.00±15.80)cm,体重(59.26±16.51)kg。本研究通过上海交通大学医学院附属第九人民医院伦理委员会批准,所有患者均签署知情同意书。

1.1.1 纳入标准 ①年龄10~70岁;②LLD差异大于5 mm(临床直接测量髌前上棘到内踝的距离);③自愿参与本研究并签署知情同意书。

1.1.2 排除标准 ①近3个月内使用过足部矫形器;②患有坐骨神经痛、腰椎间盘突出症、椎体滑脱或严重的脊柱关节炎;③有急性下背痛、背部受伤、压缩性骨折或踝关节韧带撕裂等;④患有全身性疾病,如痛风、类风湿性关节炎等。

1.2 3D打印补高鞋垫的设计与制作

1.2.1 数据采集 所有受试者均拍摄下肢力线全

长片,测量 X 线片上双下肢长度差异,并利用足部扫描系统(精迪测量技术(上海)有限公司)采集负重位下足部数据。

1.2.2 鞋垫设计 根据患者足部点云数据在 Geomagic Studio 2013 中设计鞋垫,长侧腿鞋垫采取表面贴合足部轮廓,增厚 2 mm 的设计,短侧腿鞋垫足跟杯最低点(即补高高度)按照 X 线片上双下肢差值设计,并设计合适的足弓高度。为减少鞋垫质量,对其进行拓扑结构优化。设计时对鞋垫进行网格化镂空,避免不必要的闭孔,实现轻量化设计,对连通性进行控制以克服 3D 打印清分等后处理的制造约束。

变密度法是常用的拓扑优化方法,包含两种结构模型:SIMP 模型和材料属性的合理近似(rational approximation of material properties, RAMP)模型。其中,SIMP 是一种应用较广泛的密度插值模型,可表示为:

$$E_i(x_i) = x_i^p E_0 (p \geq 1) \quad (1)$$

式中: E_0 为初始弹性模量; $E_i(x_i)$ 是可变弹性模量; x_i 是材料相对密度; p 为弹性模量惩罚因子,

$$p \geq \max\left\{\frac{2}{1-v}, \frac{4}{1+v}\right\}, \text{ 三维问题中 } p \geq$$

$$\max\left\{15 \times \frac{1-v}{7-5v}, 15 \times \frac{1-v}{1-2v}\right\}; v \text{ 为材料泊松比。}$$

对鞋垫结构进行拓扑优化时,为寻求材料密度最合理的分布位置,通常以鞋垫柔度最小化为目标函数,即等同于鞋垫刚度最大化。基于变密度法的拓扑优化数学模型可表示为:

$$\begin{cases} x_i, i = 1, \dots, N \\ \Phi(x_i) = \left\{ \sum_{i=1}^L \Omega_j^p \left[\frac{c_j(x_i) - c_j^{\min}}{c_j^{\max} - c_j^{\min}} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \rightarrow \min \\ V \leq fV_0 \\ x_{\min} \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

鞋垫优化的基本流程见图 1,采用 MinSole 软件(上海数巧信息科技有限公司)计算鞋垫结构优化形式及材料密度分布,对于不同载荷区域,通过优化点阵粗细的方式满足对于鞋垫各处弹性的要求。

本文对 3D 打印补高鞋垫进行轻量化设计,同时需保证其基本的力学性能。鞋垫前脚掌部分较薄,可优化空间较小,故选择中、后部区域作为鞋垫

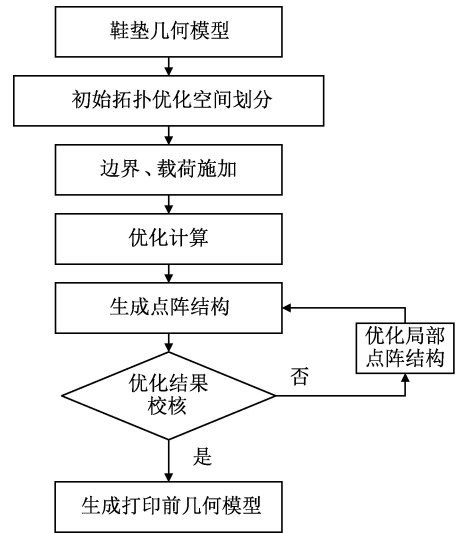


图 1 鞋垫拓扑优化流程图

Fig.1 Flow chart of insole topology optimization

拓扑优化空间。为优化鞋垫在实际载荷工况下的材料分布,需在鞋垫上表面施加等效载荷。根据行走、跑步、跳跃 3 种不同运动形式的压力分布、峰值压强、力随时间变化的规律^[8],在鞋垫上表面划分出 10 个加载区域(见图 2)。

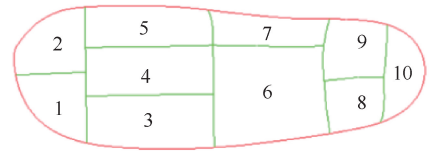


图 2 足部区域划分

Fig.2 Division of foot region

各区域施加的载荷不同,计算公式为:

$$F(i) = X(i)G$$

式中: $F(i)$ 为施加在各区域上的分布载荷; $X(i)$ 为载荷系数; G 为单脚承受的总载荷; $\sum X(i) = 1$, 见表 1。

表 1 各区域载荷系数

Tab.1 Load factor of each region

区域	载荷系数	区域	载荷系数
1	0.03	6	0.05
2	0.09	7	0.01
3	0.16	8	0.10
4	0.22	9	0.12
5	0.17	10	0.05

拓扑优化完成后得到鞋垫中、后部区域的点阵结构,根据其疏密分布及粗细分布,实现各区域材料分布的优化。受力较为集中的区域构建分布较密,同时构建尺寸较粗,以保证该区域结构在载荷作用下不会变形过大,增大足底接触面积,实现足底应力分布状态优化。将包含构建尺寸信息的中、后部鞋垫点阵结构生成三维结构模型,与前部未参与优化的区域合并。同时,考虑到穿着舒适性,在中、后部优化区域上表面附加厚度为2 mm的蒙皮(见图3)。

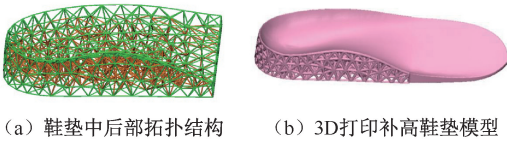


图3 3D打印鞋垫拓扑优化模型

Fig.3 Three-dimensional (3D) printed insole topology optimization model (a) Topology structure in middle and rear part of the insole, (b) 3D printed height increasing insole model

拓扑结构优化可找到最佳的传力路径,将外力传到支撑面上,而将不受力的部分进行简化或删除,其常用的方法包括人工变密度法(solid isotropic microstructures with penalization, SIMP)、米歇尔桁架理论(Michell truss theory)、演化结构优化法(EOS/BESO evolutionary structural optimization)、水平集方法(level set-based approach)等。对于适应3D打印发展的拓扑优化方法,近年国内进行大量研究。郭旭等^[9]提出可动变形组建/孔洞法(moving morphable component/moving morphable void, MMC/MMV),可将模型完全解耦,设计变量及响应分析自由度数目均可大幅度减少。程耿东等^[10]提出采用正则对偶理论的序列整数规划法,可减少灰色单元和迭代次数,增加优化效率。随着3D打印技术发展,要求结构拓扑优化方法可以充分发挥3D打印的优势、能满足制造过程的约束和不确定性,且可以提供清晰边界和特征控制的三维问题的高效设计。

1.2.3 鞋垫打印 采用选择性激光烧结(selected laser sintering, SLS)打印机(盈普硕威三维打印科技上海有限公司)进行打印,材料为Precimid 1130热塑性聚氨酯橡胶(thermoplastic polyurethanes, TPU)

粉末(盈普硕威三维打印科技上海有限公司),硬度90 A。竖放打印,打印参数:打印床温度116℃,预加热时间1.5 h,层厚0.15 mm,激光烧结时间5.5 h,冷却时间5.5 h,倒入材料6.8 kg,烧结后回收剩余粉末。鞋垫成品如图4所示。9例LLD患者的补高鞋垫经拓扑优化后,质量由原先预计的(248.68±97.84) g减小到(178.00±79.60) g,质量优化效率达(29.10±7.47)%。

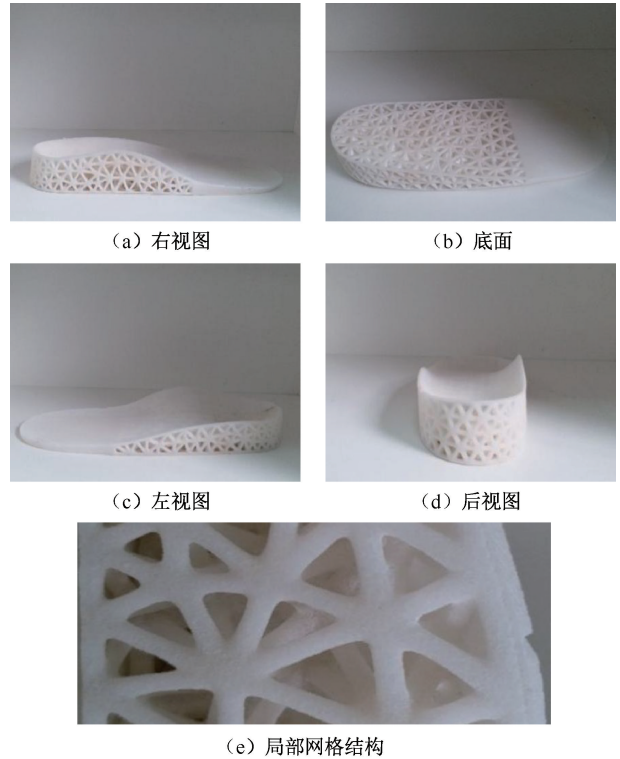


图4 3D打印补高鞋垫

Fig.4 3D printed height increasing insole (a) Right view, (b) Bottom surface, (c) Left view, (d) Rear view, (e) Partial mesh structure

1.3 3D打印补高鞋垫生物力学研究

1.3.1 实验过程 受试者中,有4例为本地患者,对其在穿鞋垫前及穿鞋垫6个月后分别进行量表评估和步态实验;另外5例为外地患者,通过随访获取量表评分数据。步态分析室配有16个红外线摄像头的Vicon® T40光学运动捕捉系统(Oxford Metrics Limited公司,英国)及4块测力板(Kistler公司,瑞士),所有步态数据都由Nexus 1.8.5软件同步触发采集。在患者骨性标志位置共粘贴44个反光标记点,包括双侧髌棘、髌前/后上棘、股骨大

转子、股骨内/外上髁、内/外踝、第 1/2/5 跖骨头、足跟,5 组动态 Clusters 组合光标分别置于双侧大腿外缘、小腿外缘及骨盆处(见图 5)。建立静态模型后,采集 10 次有效的动态数据,患者两次实验的测试用鞋均为本人同款鞋。



图 5 患者标记点位置

Fig.5 Placement of markers on the patient

1.3.2 评估指标 采用视觉模拟评分法(visual analogue scale, VAS)及 Maryland 足部功能评分表评估患者使用鞋垫前后足部的疼痛情况及功能情况。通过三维步态研究患者使用鞋垫前后步态时空参数和垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF),分析其对下肢生物力学的影响。

1.4 统计学方法

应用 SPSS 22.0 对数据进行处理分析。采用配

表 3 患者使用鞋垫前后步态时空参数比较

Tab.3 Comparison of spatiotemporal parameters for patients before and after wearing the insole

步态时空参数	使用鞋垫前		使用鞋垫后	
	长侧肢体	短侧肢体	长侧肢体	短侧肢体
步幅/m	1.14±0.11		1.13±0.15	
步速/(m·s ⁻¹)	1.00±0.05		0.97±0.10	
步长/m	0.54±0.08	0.60±0.05	0.52±0.09	0.59±0.07
跨步时间/s	1.14±0.08	1.13±0.07	1.16±0.04	1.17±0.05
步频/(steps·min ⁻¹)	113.21±10.24	100.18±8.38	110.19±8.81	101.14±9.03
支撑相/%	64.01±2.20	58.17±1.37	63.63±2.43	58.47±1.43
摆动相/%	35.99±2.20	41.83±1.37	36.37±2.43	41.53±1.43

2.3 GRF

患者使用 3D 打印补高鞋垫后,双下肢 vGRF 的第 1 和第 2 峰值均降低,差异无统计学意义($P>0.05$),见表 4 和图 6。

3 讨论

研究发现,轻度 LLD 对姿势和步态存在较大的影响,应及时对轻度 LLD 进行干预,通过矫形鞋垫来弥补腿长差异是目前治疗轻度 LLD 最常用的方

对 t 检验对患者使用鞋垫前后的数据进行比较, $P\leq 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 VAS 评分和 Maryland 足部功能评分

与使用鞋垫前相比,使用鞋垫后患者 VAS 评分显著降低($P<0.05$),Maryland 足部功能评分明显增加($P<0.05$),见表 2。

表 2 患者使用鞋垫前后 VAS 和 Maryland 足部功能评分比较

Tab.2 Comparison of VAS and Maryland foot score for patients before and after wearing the insole

评分项目	治疗前	治疗后	P	t
VAS 评分	3.78±2.11	1.00±1.23	0.000	6.934
Maryland 足部功能评分	71.89±22.86	86.33±16.13	0.003	4.155

2.2 步态时空参数

患者使用 3D 打印补高鞋垫后,步速、步幅、步长略减小,双下肢跨步时间增大,长侧肢体的步频、支撑相所占步态周期的百分比减小,摆动相所占步态周期的百分比增大,短侧肢体均呈现相反的变化,以上差异均无统计学意义($P>0.05$),见表 3。

表 4 患者使用鞋垫前后垂直地面反作用力比较

Tab.4 Comparison of vertical ground reaction force for patients before and after wearing the insole

地面反作用力	使用鞋垫前		使用鞋垫后	
	长侧肢体	短侧肢体	长侧肢体	短侧肢体
第 1 峰值/BW	1.13±0.04	1.03±0.07	1.09±0.12	0.99±0.03
第 1 峰值/BW	1.17±0.14	1.02±0.10	1.16±0.15	1.00±0.09

法,该方法可减轻肌肉骨骼疾病导致的疼痛及下肢力学的差异程度^[6-7,11-13]。3D 打印技术因其个性化

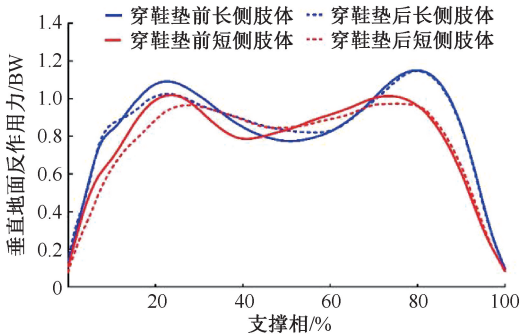


图6 患者穿戴3D打印补高鞋垫前后垂直地面反作用力曲线

Fig.6 Curve of vertical ground reaction force for patients before and after wearing the insole

特点已逐步运用于假肢矫形领域,然而目前关于将3D打印技术运用于LLD的研究鲜有报道。Wang等^[13]介绍了3D打印补高鞋垫的设计方案,并将其应用于7名LLD患者中,发现使用3D打印鞋垫可减轻疼痛,改善患者步态和健康状况,从而说明其在LLD矫正中的重大临床意义。本团队前期研究了不同网格结构对鞋垫的抗压缩性能,并使用不同网格填充率实现鞋垫各区域的支撑性;将3D打印鞋垫应用于3名LLD患者后发现,其可提高患者足部的康复效果^[14]。本文设计了一种新型3D打印LLD补高鞋垫,采用变密度法对鞋垫的拓扑结构进行优化,根据鞋垫的受力分区进行力的加载和边界条件的设置,使鞋垫在满足人体不同运动的力学性能需求的同时,降低鞋垫质量和制作成本。

3.1 LLD补高鞋垫对疼痛及足部功能的影响

LLD常可导致一系列的骨骼肌肉系统问题,包括下背痛、关节炎、足痛等疾病。本研究中,患者均存在足痛,在使用3D打印补高鞋垫后,所有患者VAS评分均显著降低,Maryland足部功能评分显著增加,这可能与鞋垫的计算机辅助设计有关。该技术按照足部各区域受力情况设计与患者足底完全贴合的鞋垫,平衡足底压力,减少足部异常受力,增加足部行走时的舒适性,有效缓解足部疼痛,进而改善足部的功能情况。

3.2 LLD补高鞋垫对vGRF的影响

研究发现,LLD患者在行走过程中双下肢vGRF较正常人明显增大^[5,15]。下肢关节承受更大的地面冲击力,长期的积累可能会对双下肢髌、膝、踝关节产生慢性影响,引发骨关节炎^[4-5]。本研究

表明,患者使用鞋垫后,双下肢vGRF存在减小趋势,推测原因是鞋垫给足底提供相应支持,使足部保持中立位,纠正下肢不正确的力线模式;鞋垫各区域设计不同的力学载荷系数,不同密度和粗细的网状结构在满足基本力学性能的同时,也起到部分缓冲作用,从而减小地面冲击力,对人体下肢骨关节具有一定的保护作用。

3.3 LLD补高鞋垫对步态时空参数的影响

人体正常步态需具备适当的步长、步宽和步频,具有一定的节律性,正常行走时步频为95~125 steps/min,支撑相约占步态周期的60%,摆动相约占40%。LLD患者在行走时常出现不对称步态^[16]。在本研究中,患者未穿戴鞋垫前的步态也显示出明显的不对称性,长侧肢体行走时步频更快,支撑相更长,长期的不对称步态可能会导致下肢关节积累较大的载荷,引发膝骨关节炎^[17]。在使用拓扑结构优化的鞋垫后,长侧肢体的步频减小,短侧肢体步频增大,左右两侧的步频差距缩小,支撑相与摆动相的双下肢差值减小,步态更接近正常人的时相特点,推测原因是补高鞋垫能够纠正双下肢长度的不对称性,同时减轻下肢关节的受力和疼痛,患者在行走时左右肢体呈现出更加自然的步态,从而提升下肢运动的协调性。

在步态分析中,步长和步速是步行能力的主要指标,步行能力与身高、体重、年龄及下肢肌力和平衡等因素相关^[18-19]。下肢肌力和平衡感越强,步速越快。本文结果表明,步长、步速没有提高,可能与患者长期肌力不均有关。患者双下肢的跨步时间延长,步幅轻微减小,可能与双侧鞋垫质量不等有关,短侧肢体足部负重更大,为适应足部负重变化,人体可能采取相应的步态调节。因此,下一步的研究将聚焦于选择更轻的材料打印,减轻鞋垫的质量。另外,由于样本量较少,个体差异较大,可能会影响步态参数的变化。

4 结论

本文重点研究3D打印LLD补高鞋垫的拓扑结构设计及在临床应用后对LLD患者下肢生物力学的影响。结果显示,3D打印补高鞋垫可提高双下肢运动节律的协调性,减缓地面冲击力,缓解疼痛和改善足部功能。本文结果表明,3D打印LLD补高

鞋垫可为临床上矫正 LLD 提供一种个性化精准治疗方案。但本研究也存在一定的局限性:① 应用病例较少,有些数据尽管出现变化,但差异无统计学意义,可能与受试者存在个体差异有关,后续应扩大样本量,继续观察其对 LLD 患者下肢生物力学的影响;② 所研究的生物力学参数不全面,仅关注步态时空参数与 GRF,后续在扩大样本量的同时,应关注其对下肢运动学和关节力矩的影响。

参考文献:

- [1] RACZKOWSKI JW, DANISZEWSKA B, ZOLYNSKI K. Functional scoliosis caused by leg length discrepancy [J]. *Arch Med Sci*, 2010, 6(3): 393-398.
- [2] DEFRIN R, BENYAMIN SB, ALDUBI RD, *et al.* Conservative correction of leg-length discrepancies of 10 mm or less for the relief of chronic low back pain [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(11): 2075-2080.
- [3] KIM C, NEVITT M, GUERMAZI A, *et al.* Brief report: Leg length inequality and hip osteoarthritis in the multicenter osteoarthritis study and the osteoarthritis initiative [J]. *Arthritis Rheumatol*, 2018, 70(10): 1572-1576.
- [4] GORDON JE, DAVIS LE. Leg length discrepancy: The natural history (and what do we really know) [J]. *J Pediatr Orthop*, 2019, 39: S10-S13.
- [5] 宋亮, 邢阳辉, 康婷, 等. 下肢不等长对步态影响的实验分析 [J]. *医用生物力学*, 2016, 31(6): 501-505.
SONG L, XING YH, KANG T, *et al.* Effects of leg length discrepancy on gait: An experimental study [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(6): 501-505.
- [6] MCCAW ST, BATES BT. Biomechanical implications of mild leg length inequality [J]. *Br J Sports Med*, 1991, 25(1): 10-13.
- [7] CAMPBELL TM, GHAEDI BB, GHOGOMU ET, *et al.* Shoe lifts for leg length discrepancy in adults with common painful musculoskeletal conditions: A systematic review of the literature [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2018, 99(5): 981-993.
- [8] 刘丽. 鞋底减震结构对足部减震系统影响的研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2015.
- [9] ZHANG W, LI D, ZHOU J, *et al.* A moving morphable void (MMV)-based explicit approach for topology optimization considering stress constraints [J]. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2018, 334: 381-413.
- [10] XU L, CHENG G. Two-scale concurrent topology optimization with multiple micro materials based on principal stress orientation [J]. *Struct Multidiscipl Optim*, 2018, 57(5): 2093-2107.
- [11] MENEZ C, L' HERMETTE M, COQUART J. Orthotic insoles improve gait symmetry and reduce immediate pain in subjects with mild leg length discrepancy [J]. *Front Sports Act Living*, 2020, 2: 579152.
- [12] KENDALL JC, BIRD AR, AZARI MF. Foot posture, leg length discrepancy and low back pain--their relationship and clinical management using foot orthoses--An overview [J]. *Foot*, 2014, 24(2): 75-80.
- [13] WANG K, LU C, YE R, *et al.* Research and development of 3D printing orthotic insoles and preliminary treatment of leg length discrepancy patients [J]. *Technol Health Care*, 2020, 28(6): 615-624.
- [14] 王向前, 高汉义, 王金武, 等. 下肢不等长患者的 3D 打印矫形鞋垫的设计与应用 [J]. *生物医学工程研究*, 2020, 39(4): 397-400.
- [15] AZIZAN NA, BASARUDDIN KS, SALLEH AF, *et al.* Leg length discrepancy: Dynamic balance response during gait [J]. *J Healthc Eng*, 2018, doi: 10.1155/2018/7815451.
- [16] AZIZAN NA, BASARUDDIN KS, SALLEH AF. The effects of leg length discrepancy on stability and kinematics-kinetics deviations: A systematic review [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2018, doi: 10.1155/2018/5156348.
- [17] 林玉屏, 程刚, 郭锋, 等. 单侧全膝置换前后女性患者步态特征分析 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(4): 461-466.
LIN YP, CHENG G, GUO F, *et al.* Gait characteristics of female patients before and after unilateral total knee arthroplasty [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(4): 461-466.
- [18] 皮红英, 库洪安, 赵婷. 下肢肌力训练对老年人平衡及运动能力的影响 [J]. *解放军护理杂志*, 2017, 34(12): 51-54.
- [19] CHEHAB EF, ANDRIACCHI TP, FAVRE J. Speed, age, sex, and body mass index provide a rigorous basis for comparing the kinematic and kinetic profiles of the lower extremity during walking [J]. *J Biomech*, 2017, 58: 11-20.