

医学影像测量分析负重站立位足部骨骼的自身调节能力

<https://doi.org/10.12307/2022.185>

高毅, 马越, 赵泽宇

投稿日期: 2021-04-06

送审日期: 2021-04-07

采用日期: 2021-06-01

在线日期: 2021-08-09

中图分类号:

R459.9; R318; R814

文章编号:

2095-4344(2022)06-00959-04

文献标识码: B

文章快速阅读:

对象

• 健康青壮年男性学生 100 例。

观察指标

• 足骨长度、拇外展角、一二跖骨长度差、跖区宽度、二五跖骨长度差、五趾内收角(小趾内翻)。

文章结论

• 与正常站立状态相比, 负重状态时足骨长度、跖区宽度、二五跖骨长度差显著性增加 ($P < 0.01$);
• 与正常站立状态相比, 负重状态时拇外展角、五趾内收角(小趾内翻)、一二跖骨长度差无显著性差异 ($P > 0.05$), 拇外展角、五趾内收角、一二跖骨长度差具有稳定性, 可应用于医学足部骨骼关节观察测量研究及法医学检验鉴定;
• 负重前后拇外展角度改变用于区分轻度拇外翻患者及健康人群。

文题释义:

足骨长度(SPCL): 采用第二趾骨远端点与跟骨后凸中心点连线作为足骨水平中轴线, 选取拇趾或二趾之中较长趾骨远端在中轴线上投影到跟骨后凸点之间的距离作为足骨长度。

拇外展角(HVA): 拇趾的第一、二趾骨轴线夹角。第一趾骨轴线由远、近端关节面中点确定, 第二趾骨轴线由骨干远端点及近端关节面中点确定。

摘要

背景: 通过将传统X射线医学影像技术、数字化软件与解剖学结合, 直观获取人体足部骨骼图像, 可便于观察及测量足部各骨骼变化。当前国内外相关研究多集中于足部的病理状态、足底压力分布, 有关人体在负重状态下的足部骨骼变化相关研究较少。

目的: 探讨负重站立状态下足部骨骼变化。

方法: 入选100例健康青壮年男性学生, 采用中国刑事警察学院专项开发的足迹测量专用软件对X射线影像足部骨骼特征进行测量, 记录正常状态与负重状态的人体足部骨骼相关数据。

结果与结论: ①与正常站立状态相比, 负重状态时足骨长度、跖区宽度、二五跖骨长度差显著性增加($P < 0.01$); ②与正常站立状态相比, 负重状态时拇外展角、五趾内收角(小趾内翻)、一二跖骨长度差无显著性差异($P > 0.05$), 具有稳定性, 可应用于医学足部骨骼关节测量研究及法医学检验鉴定; ③负重前后拇外展角度改变用于区分轻度拇外翻患者及健康人群。

关键词: 足部骨骼; 拇外展角; X射线; 数字化技术; 负重站立

Foot bone self-regulation under weight-bearing standing analyzed by medical imaging measurement

Gao Yi, Ma Yue, Zhao Zeyu

Key Laboratory of Trace Inspection and Identification Technology, Ministry of Public Security, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, Liaoning Province, China

Gao Yi, Master, Associate professor, Key Laboratory of Trace Inspection and Identification Technology, Ministry of Public Security, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, Liaoning Province, China

Corresponding author: Gao Yi, Master, Associate professor, Key Laboratory of Trace Inspection and Identification Technology, Ministry of Public Security, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, Liaoning Province, China

Abstract

BACKGROUND: Through the combination of traditional X-ray technology, digital software and anatomy, the visually obtained images of the human foot bones are easy to observe and measure the changes in the bones of the foot. At present, relevant domestic and foreign researches focus on pathological conditions of foot and plantar pressure distribution, and there are few studies on the changes of foot bones under weight-bearing conditions.

OBJECTIVE: To explore the changes in the foot bones in the standing state.

METHODS: Totally 100 healthy young male students were selected. Special software developed by Criminal Investigation Police University of China for footprint measurement was used to measure the characteristics of the foot bones in the X-ray. Data of the human foot bones in normal and weight-bearing states were recorded.

中国刑事警察学院痕迹检验鉴定技术公安部重点实验室, 辽宁省沈阳市 110035

第一作者: 高毅, 男, 1978年生, 吉林省吉林市人, 汉族, 硕士, 副教授, 主要从事足迹生物特征识别研究。

通讯作者: 高毅, 硕士, 副教授, 中国刑事警察学院痕迹检验鉴定技术公安部重点实验室, 辽宁省沈阳市 110035

<https://orcid.org/0000-0001-8130-1291> (高毅)

基金资助: 公安部科技强警基础工作专项项目(2015GABJC08), 项目负责人: 马越; 辽宁省自然科学基金引导计划项目

(20180550153), 项目负责人: 高毅; 中国刑事警察学院研究生创新能力提升项目(2020YCZD05), 项目负责人: 赵泽宇

引用本文: 高毅, 马越, 赵泽宇. 医学影像测量分析负重站立位足部骨骼的自身调节能力[J]. 中国组织工程研究, 2022,

26(6):959-962.



RESULTS AND CONCLUSION: (1) Compared with the normal standing state, the weight-bearing state had a significant increase in the foot bone length, width, and the difference in the length of the second and fifth metatarsal bones ($P < 0.01$). (2) Compared with the normal standing state, the weight-bearing state had no significant effect on the hallux abduction angle, the little toe varus angle, and the length difference between the first and second metatarsals ($P > 0.05$), with stability. It can be used in medical foot bone and joint measurement research and forensic examination and identification. (3) The change of hallux valgus angle before and after loading was used to distinguish mild hallux valgus patients from healthy people.

Key words: foot bone; hallux valgus angle; X-ray; digital technology; weight bearing standing

Funding: Science and Technology Strengthening Police Fundamental Work Special Project of Ministry of Public Security, No. 2015GABJC08 (to MY); Natural Science Foundation Guidance Program of Liaoning Province, No. 20180550153 (to GY); Graduate Innovation Ability Improvement Project of Criminal Investigation Police University of China, No. 2020YCD05 (to ZZY)

How to cite this article: GAO Y, MA Y, ZHAO ZY. Foot bone self-regulation under weight-bearing standing analyzed by medical imaging measurement. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2022;26(6):959-962.

0 引言 Introduction

足作为重要的人体运动肢体结构，负责承担体质量和运动冲击的动量变化。结合相关国内足部医学研究结果，运动状态、生理状态的改变会对足部骨骼带来影响，足部骨骼是足部结构的框架核心，人体通过足部骨骼改变可维持平衡^[1-3]。

国内外学者利用医学影像技术对足部骨骼变化进行观察，结果发现负重状态会影响人体足底压力的分布，进而引起足部三维骨骼结构发生变化，但长期负重会对人体足部骨骼造成损伤^[4-6]。研究指出理想骨科影像检查的条件应该为静止站立下的负重状态^[7-9]。当前有关负重状态下足部研究多集中于踝关节及足底压力的改变，而有关负重下的足骨变化研究较少。在此基础上，该研究提取负重状态下足部骨骼关键信息，对医学的影像诊断、法庭科学的足迹鉴定方向均有着重要意义。

国内外足部骨骼方向研究指出，单一指标无法展示出足部骨骼的状态^[10-13]，因此急需开展足部骨骼变化的评价方法，提高测量的准确性、便利性^[14-15]。

该研究通过对静止站立及负重站立两种状态下水平方向足部骨骼进行X射线拍摄及数字化软件测量分析，观察水平方向的足部骨骼长度及角度改变等多种参数指标，为负重状态下的骨骼有限元构建以及为术后携带装置患者的足部骨骼变化研究打下基础，为负重状态下人体骨骼、步态变化提供科学性依据，减少经验主义判断，丰富法医学及足部解剖学、足迹学方向研究科学性理论。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 通过对正常站立及负重站立位的足部骨骼关系进行比对观察。

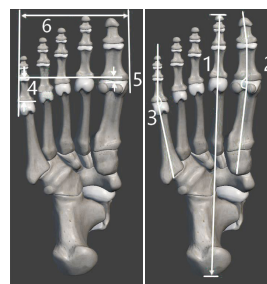
1.2 时间及地点 资料收集和测试于2015年9月至2017年7月在中国刑事警察学院平面足迹实验室完成。

1.3 对象 选取中国刑事警察学院的健康青壮年男性学生100名(为法庭科学体系下常见犯罪现场的人身条件)，年龄20-30岁，体质量70-90 kg，身高175-190 cm，体态正常(体质量指数18-25 kg/m²之间)。采用X射线片对正常站立及负重站立两种状态下的右足足部骨骼关系进行记录，并利用专用数字化软件分别测量两种状态下的足部骨骼影像，遵循保密协议。

纳入标准：①足部X射线片清晰、边缘明显；②受试者站立状态正常。

排除标准：经过足部手术、具有足部畸形(如多趾、少趾等)、平足、拇外翻及糖尿病、偏瘫、过度肥胖等影响行走姿态的疾病^[16-19]。

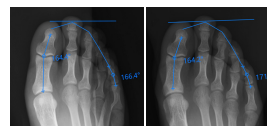
1.4 测算软件 采用三维数字图像技术，见图1，以及中国刑事警察学院专用足迹检验辅助测绘软件，利用图像灰度及人工辅助对负重前后的足骨长度、拇外展角、一二跖骨长度差、二五跖骨长度差、足骨跖区宽度、五趾内收角进行测量，并记录负重及正常状态下两组X射线拍摄的骨骼数据，见图2-4。



图注：1为足骨长(SPCL)；2为拇外翻角(HVA)；3为五趾内收角(FPVA)；4为二五跖骨长度差(DBML2-5)；5为一二跖骨长度差(DBML1-2)；6为足骨宽(MW1-5)

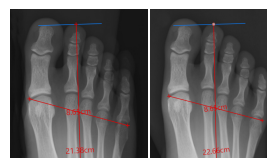
图1 | 足部三维数字图像及测量指标模型展示

Figure 1 | Three-dimensional images of foot and measurement parameters



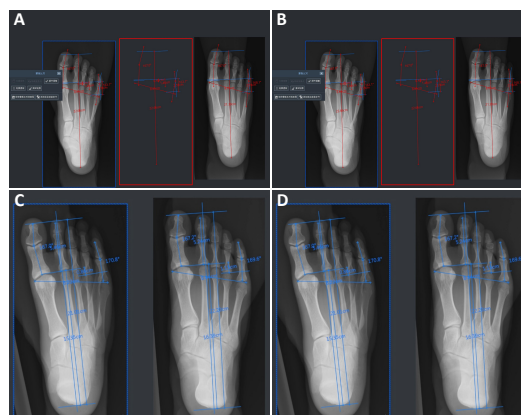
图注：通过测绘软件对拇外展角、五趾内收角指标进行标画(左为正常站立状态，右为负重站立状态)

图2 | 测绘软件测量负重前后拇外展角、五趾内收角指标展示
Figure 2 | Display of hallux valgus angle and angle between the fifth metatarsal and the axis of proximal phalanx before and after weight bearing measured using software



图注：通过测绘软件对足骨跖区宽进行标画(左为正常站立状态，右为负重站立状态)

图3 | 测绘软件测量负重前后足骨跖区宽指标展示
Figure 3 | Display of metatarsal width before and after weight bearing using software



图注：图A，B为测试者1正常、负重站立状态下对足部骨骼各指标进行标画及比对；C，D为测试者2正常、负重站立状态下对足部骨骼各指标进行标画及比对

图4 | 采用测绘软件测量整体指标展示
Figure 4 | Display of all indicators before and after weight bearing using software

采用数字软件测量,避免在X射线片上手绘线测量可重复性差、精度受观察光线影响的弊端。

1.5 实验方法 为清晰、有效地观察出人体负重条件下足部骨骼的变化,采用约为0.4倍的体质量负重,综合平均体质量参数,负重定为30 kg。利用X射线影像学技术对正常及负重双足站立状态下的右足足部骨骼关系进行拍摄,X射线拍摄方向:中球管指向第二跖骨轴线中点,人体矢状面内与纵轴夹角保持20°,球管与感光片盒相距100 cm;拍片位置采用正位;受试者为静止双足站立,双肩背包负重,双足足跟间距控制在10-15 cm之间^[9, 20]。利用数字化软件测量各指标:足骨长度、拇外展角、一二跖骨长度差、二五跖骨长度差、足骨跖区宽度、五趾内收角。

1.6 主要观察指标 ①足骨长度(SPCL):第二趾骨远端点与跟骨后凸中心点连线作为足骨水平中轴线,选取拇趾或二趾之中较长趾骨远端在中轴线上垂直投影到跟骨后凸中心点之间的距离。为避免误差影响采用最长足骨长度,并且负重前后采用统一标准观测;②拇外展角(HVA):拇趾的第一、二趾骨轴线之间夹角。第一趾骨轴线由远、近端关节面中点决定,第二趾骨轴线由第二跖骨轴线由近、远端关节面中点连线决定;③一二跖骨长度差(DBML1-2):第一、二跖骨远端关节面中点在第二跖骨轴线上的垂直距离。第二跖骨轴线由近、远端关节面中点连线决定;④二五跖骨长度差(DBML2-5):第二、五跖骨远端关节面中点在第二跖骨轴线上的距离,第二跖骨轴线由远、近端关节面中点确定;⑤足骨跖区宽度(MW1-5):第一跖骨远端关节面内侧凸点与第五跖骨远端关节面外侧凸点在足骨长轴线的垂线距离;⑥五趾内收角(FPVA):第五跖骨与近节趾骨轴线之间夹角。轴线均由远、近端关节面的中点决定。**1.7 统计学分析** 所有数据经过SPSS 21.0软件包进行统计处理,对负重站立及正常站立状态下足部骨骼变化进行分析, $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 为差异有显著性意义,采用配对样本t检验方法。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 健康青壮年(20-30岁之间)男性受试者共100名,全部纳入结果分析。

2.2 基本资料分析 参与者的年龄为(24.37±3.05)岁,身高为(182.01±4.11)cm,体质量为(75.20±7.25)kg、体质量指数为(22.70±2.06)kg/m²。选取的样本为常见男性体态区间,具有良好的普适性。

2.3 正常站立与负重站立状态下足部骨骼各测量值 两种状态下部分足部骨骼状态差异有显著性意义($P < 0.05$),负重状态会对足部骨骼产生影响,其影响表现为足骨长度、足骨跖区宽及二五趾骨长度差上的显著性变化,见表1。

表1 | 正常站立与负重站立状态下足部骨骼各测量值 ($\bar{x} \pm s, n=100$)
Table 1 | Bone measurements of the foot at the base of normal standing and loading stations

指标	正常状态	负重状态	t 值	P 值	r 值
足骨长度 (cm)	21.722±0.627	21.855±0.586	13.674 4	0	0.941 44
拇外展角 (°)	164.512±4.624	164.559±4.837	0.269 689	0.854 7	0.983 96
一二跖骨长度差 (cm)	0.751±0.482	0.754±0.477	0.251 462	0.691 1	0.945 63
二五跖骨长度差 (cm)	2.412±0.299	2.426±0.298	6.593 004	0	0.943 56
足骨跖区宽 (cm)	8.436±1.017	8.603±1.024	14.461 5	0	0.914 16
五趾内收角 (°)	167.394±2.423	168.488±2.373	1.956 44	0.716 7	0.866 53

在静止站立条件下,正常状态与负重状态下足骨长度相关系数为0.94, $P < 0.01$,呈显著正相关,负重状态可增加足骨长度;正常状态与负重状态下拇外展角相关系数为0.98, $P > 0.05$,负重与足骨拇外展角变化存在相关性,但其影响不显著,并且角度变化可能由测量环节或者站立平衡状态差异导致;正常状态与负重状态一二跖骨长度差相关系数为0.94, $P > 0.05$,说明一二跖骨发生变化,但变化并不显著,具有稳定性;正常状态与负重状态下二五跖骨长度差相关系数为0.94, $P < 0.01$,呈显著正相关,负重状态可带来二五跖骨长度差的增加;正常状态与负重状态下足骨跖区宽相关系数为0.91, $P < 0.01$,呈显著正相关,负重状态可带来足骨跖区宽的增加;正常状态与负重状态下五趾内收角相关系数为0.86, $P > 0.05$,负重与五趾内收角变化存在相关性,但其差异不显著,具有稳定性。

2.4 不良事件 试验过程中无不良事件发生。

3 讨论 Discussion

足部骨骼变化是临床上常见或疑难疾病的病症表现之一。通过足部骨骼、压力等指标的变化,可判断疾病的病理状态,如糖尿病等^[21-23]。因此排除常见非病理影响的足部骨骼变化,对当前的临床实践具有研究意义^[24]。负重作为常见的人体状态,足部骨骼的相关研究对长期处于负重工作及术后携带体外装置病患的足部骨骼病变及其他疾病的病理状况分析具有较高研究价值,可为相关医学观察研究及法庭科学体系下的人身认定提供新的依据。

此次研究结果指出,正常状态与负重状态下足部骨骼的位置关系具有差异,负重状态会使得水平方向的足骨长度、跖区宽度显著性增加。国内外学者对负重状态下的足部变化研究指出,负重状态会增加足长足宽,进而导致足型发生改变,与此次研究相互印证,进一步说明在负重状态下足部骨骼为适应负重状态,部分足部骨骼的空间位置关系发生改变^[25-29]。

在负重状态下一、二跖区的长度差改变并不显著,反映了一二跖骨间关系在负重情况不发生显著性改变,具有一定结构稳定性;二五跖骨长度差增加,二五跖区足部骨骼的位置关系在负重前后具有显著性差异。根据国内霍洪峰等^[30-34]研究认为负重状态下,通过前脚掌内侧区域的压力峰值的提升可起到维持身体平衡的作用,且足部在此状态下会产生内翻。因此在临床研究及法医学中对一二跖骨的病态改变,可排除相关负重状态的影响,结合法庭科学体系的足迹检验技术,依据一二跖骨关节长度测量值的稳定性可进行人身分析;同时在相关的足底压力研究中指出,负重状态下的足底压力集中在足内侧区域,足内外侧压力分布发生改变,依据二五跖骨长度差的改变进行负重状态的预测^[35-37]。

此次研究结果还指出正常青壮年男性的拇外展角、五趾内收角具有稳定性,在正常站立与负重站立两种情况下,拇外展角、五趾内收角变化不明显,负重状态对其影响并不显著。当前国内外对拇外翻影响因素研究中指出,拇外翻可能由遗传及长期穿尖头高跟鞋等穿鞋习惯及行走习惯所引起,且负重可突出拇外翻畸形患者的拇外翻角度^[38-39]。结合此次研究结论,可将负重前后拇外展角度改变用于区分轻度拇外

翻患者及健康人群。

此次五趾内收角并没有显著性改变的结论,证明负重使趾间关节的活动方向与趾内收角变化方向相一致,进而五趾的内收角度并不具有显著性差异,更说明部分微动关节在负重状态下虽然具有变化,但其改变并不显著,进而说明足部微动关节的显著性病态改变与负重状态无关,具有稳定性。基于法医解剖学理论,结合此次研究,证明负重对拇外展角、五趾内收角的改变并不显著,可应用于医学足部骨骼关节观察测量研究及法医学检验鉴定。

综上,在负重状态下的医学足部骨骼观察,为医学诊断及法庭科学体系的足迹检验鉴定提供理论依据。

此次研究存在的不足之处:①对于三维立体方向上的改变并不能做到大量分析,今后需增大试验样本,更好地构建足部骨骼的关系变化;②该试验提供方案可能对负重状态的研究并不具体,并不能分析多种负重状态下的变化,数据量较小无法完整体现。

作者贡献: 文章全部作者均参与文章的撰写和评估,第一作者完成初稿写作,最后由通讯作者审核。

经费支持: 该文章接受了“公安部科技强警基础工作专项项目(2015GABJC08)”“辽宁省自然科学基金引导计划项目(20180550153)”及“中国刑事警察学院研究生创新能力提升项目(2020YCDZ05)”的资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

机构伦理问题: 该研究的实施符合中国刑事警察学院的相关伦理要求。

知情同意问题: 参与研究的受试者为自愿参加,均对试验过程完全知情同意。

写作指南: 该研究遵守《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

生物统计学声明: 文章统计学方法已经通过中国刑事警察学院统计学专家审核。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

[1] 白啸天,霍洪峰.足踝功能的生物力学测评:构建足静态和动态评价指标[J].中国组织工程研究,2021,25(17):2747-2754.

[2] 吴然,白姣姣.基于足踝生物力学的糖尿病足护理研究进展[J].护理学杂志,2019,34(3):13-17.

[3] 孙献坤,袁丽.糖尿病足溃疡患者非负重运动的研究进展[J].中华护理杂志,2019,54(8):1161-1164.

[4] 马越,杨明阳,郭勇,等.基于X光影像学检验的赤足迹特征稳定性分析[J].中国刑警学院学报,2019(2):85-88.

[5] LEDOUX WR, ROHR ES, CHING RP, et al. Effect of foot shape on the three-dimensional position of foot bones. J Orthop Res. 2006;24(12):2176-2186.

[6] 程晓光,李娜.站立负重成像技术在骨科应用进展[J].中国骨与关节杂志,2016,5(8):561-563.

[7] 王增刚,王金之,冯茹,等.负重对行军士兵下肢步态特征的影响[J].医用生物力学,2018,33(4):360-364,371.

[8] 佟苏洋,汤澄清.背包负重行走对足底压力动力学特征影响的研究[J].广东公安科技,2019,27(2):21-25.

[9] 张腾宇,张静莎,季润,等.不同负重方式对老年人行走影响的比较分析[J].中国运动医学杂志,2018,37(12):1005-1010.

[10] PEETERS K, SCHREUER J, BURG F, et al. Altered talar and navicular bone morphology is associated with pes planus deformity: a CT-scan study. J Orthop Res. 2013;31(2):282-287.

[11] 蔡宇辉,侯曼,郑秀瑗,等.用3维重构技术分析足部骨组织的外翻特性[J].北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(5):541-543.

[12] 黄萍,钱念东,齐进,等.拇外翻发病危险因素与足底压力特征[J].中国组织工程研究,2016,20(42):6351-6356.

[13] 何媛媛,丁呈彪,张薇薇,等.老年肌肉减少症患者的足底压力变化[J].中国组织工程研究,2020,24(14):2223-2228.

[14] 张新语,霍洪峰.足型测量方法及足型特征研究进展[J].中国康复医学杂志,2019,34(7):875-879.

[15] 高毅,马越,赵泽宇,等.人体赤足形态特征接触面积与身高体质量相关性统计分析[J].中国组织工程研究,2021,25(32):5103-5108.

[16] KIDO M, IKOMA K, IMAI K, et al. Load response of the tarsal bones in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study. Foot Ankle Int. 2011; 32(11):1017-1022.

[17] YOSHIOKA N, IKOMA K, KIDO M, et al. Weight-bearing three-dimensional computed tomography analysis of the forefoot in patients with flatfoot deformity. J Orthop Sci. 2016;21(2):154-158.

[18] 王文成,张兴飞,许亚军.数字化技术在拇外翻治疗中的应用[J].中国组织工程研究,2021,25(12):1911-1916.

[19] ROKKEDAL-LAUSCH T, LYKKE M, HANSEN MS, et al. Normative values for the foot posture index between right and left foot: a descriptive study. Gait Posture. 2013;38(4):843-846.

[20] 赵功赫,曲峰,杨辰,等.躯干不同负重方式对人体步行的生物力学影响[J].体育学刊,2017,24(2):128-134.

[21] 沈雯琦,刘芳.步态分析在糖尿病周围神经病变患者中的研究进展[J].中华糖尿病杂志,2019(8):558-561.

[22] 彭春政,陆爱云.有限元分析在足部生物力学研究中的应用现状[J].中国运动医学杂志,2010,29(3):379-382.

[23] HIDA T, OKUDA R, YASUDA T, et al. Comparison of plantar pressure distribution in patients with hallux valgus and healthy matched controls. J Orthop Sci. 2017; 22(6):1054-1059.

[24] 何晓宇,王朝强,周之平,等.三维有限元方法构建足部健康骨骼与常见疾病模型及生物力学分析[J].中国组织工程研究,2020,24(9):1410-1415.

[25] HONERT EC, BASTAS G, ZELIK KE. Effects of toe length, foot arch length and toe joint axis on walking biomechanics. Hum Mov Sci. 2020;70:102594.

[26] 李晓芸,冉诗雅,杨璐铭,等.三种负重状态下青年女性的三维脚型数据对比分析[J].皮革科学与工程,2016,26(5):48-54.

[27] 李晓芸,张林杉,杨璐铭,等.三种负重状态下青年男性三维脚型数据的研究[J].中国皮革,2016,45(10):54-59.

[28] FRASER JJ, HERTEL J. The quarter-ellipsoid foot: A clinically applicable 3-dimensional composite measure of foot deformation during weight bearing. Foot (Edinb). 2021;46:101717.

[29] PAU M, MANDARESU S, LEBAN B, et al. Short-term effects of backpack carriage on plantar pressure and gait in schoolchildren. J Electromyogr Kinesiol. 2015; 25(2):406-412.

[30] 霍洪峰,王子乾,梁玉,等.基于聚类分析的足横弓承重类型及足底压力特征[J].中国组织工程研究,2012,16(7):1251-1254.

[31] 朱瑶佳,霍洪峰.不同姿势站立时人体的平衡能力及足型特征[J].中国组织工程研究,2019,23(15):2345-2349.

[32] 赵美雅,倪义坤,田山,等.行走过程中不同背包负重方式对人体生理参数的影响[J].医用生物力学,2015,30(1):8-13.

[33] SEAY JF. Biomechanics of Load Carriage--Historical Perspectives and Recent Insights. J Strength Cond Res. 2015;29 Suppl 11:S129-133.

[34] CARLTON SD, ORR RM. The impact of occupational load carriage on carrier mobility: a critical review of the literature. Int J Occup Saf Ergon. 2014;20(1): 33-41.

[35] NURSE MA, NIGG BM. The effect of changes in foot sensation on plantar pressure and muscle activity. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2001;16(9): 719-727.

[36] OTA T, NAGURA T, YAMADA Y, et al. Effect of natural full weight-bearing during standing on the rotation of the first metatarsal bone. Clin Anat. 2019;32(5):715-721.

[37] 王永峰,任磊,李荣.足的解剖结构与足迹形成关系的研究[J].刑事技术,2013(5):44-46.

[38] 李刚,孟祥虹,王植.双足负重与非负重位数字化X线摄影对拇外翻畸形角度测量的对比研究[J].实用医学影像杂志,2019,20(3):224-226.

[39] 郭娟,钱丽霞,王晓东.MRI评价拇外翻畸形:拇趾跖趾关节结构及位置的变化[J].中国组织工程研究,2019,23(24):3857-3861.

(责任编辑: MZH, ZN, ZH)