

文章编号: 1004-7220(2022)03-0518-07

一种基于足压数据主成分分析的足弓形态智能检测方法

谷彦颀¹, 蒋东港¹, 李思远¹, 耿翔², 陈文明^{1*}, 马昕^{2*}

(1. 复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200433; 2. 复旦大学附属华山医院 骨科, 上海 200040)

摘要:目的 根据临床中平足与高弓足量化评估的要求,提出一种基于足压数据主成分分析(principal component analysis, PCA)智能快速足弓形态检测方法,并验证其临床有效性。方法 纳入诊断为足弓异常与足弓健康的志愿者,设计研发一套便携式足弓智能检测系统。采用44×52阵列式薄膜压阻传感器,采集静态站立式足底压力分布数据,利用自行编写的PCA算法自动拟合足轴线,进行足弓诊断并生成诊断报告。将足压采集结果与现有设备进行比对,验证足压数据的准确性。对于平足、高弓足和正常3类足弓的判别算法,通过对比临床诊断验证评估准确性。结果 该系统与现有压力采集设备的测量结果具有较好的相关性,接触面积偏差低于3.2%,计算拟合的足轴线与临床定义角度偏差小于1°,且该系统能获得与临床中足弓形态诊断相符率92.6%的评估结果。结论 引入PCA对足轴线自动化拟合,实现了快速而准确提取足弓信息的目的。该方法可用于临床实践中平足与高弓足的辅助筛查,有助于开展足弓畸形程度的量化分析和病理机制的研究。

关键词:足部诊断;足底压力;主成分分析;平足;高弓足

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.021

An Intelligent Arch Diagnostic Method Based on Principal Component Analysis of Plantar Pressure Distribution

GU Yanjie¹, JIANG Donggang¹, LI Siyuan¹, GENG Xiang², CHEN Wenming¹, MA Xin²

(1. Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2 Department of Orthopedics, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

Abstract: Objective According to clinical demand of quantification evaluation on flat foot and high arch, an intelligent and rapid method to diagnose arch shape based on principal component analysis (PCA) of plantar pressure is proposed, and its clinic validity is tested. **Methods** Volunteers diagnosed as abnormal arch and healthy arch were included in this study, and a portable intelligent arch test system was designed and developed. By adopting thin-film piezoresistive sensor array with 44 rows, 52 columns of sensing units, the system could collect plantar pressure distribution data from the subjects under static standing. Foot axis could be fitted automatically by using the self-programmed PCA, so that foot diagnosis was completed with diagnostic report. The plantar pressure results from the system were compared with those from the existing plantar pressure

收稿日期:2021-03-17; 修回日期:2021-05-11

基金项目:上海市科技创新行动计划生物医药科技支撑专项(20S31901000)

通信作者:陈文明,副研究员,E-mail: wncchen@fudan.edu.cn;马昕,教授,E-mail: prof.xin.ma@qq.com

*为共同通信作者

acquisition device, so as to verify precision of collected data. The accuracy of the diagnosis algorithm for flat foot, high arch and healthy foot was verified through comparison with clinical diagnosis. **Results** The result of the system had a good correlation with that of the existing plantar pressure acquisition device, the deviation of contact area acquired by the system was smaller than 3.2%, and the angle deviation of the fitted foot axis with clinically defined angel was less than 1° . The system was capable of making diagnosis on arch shape that was 92.6% consistent with the clinical diagnosis. **Conclusions** PCA is introduced to automatically fit foot axis to achieve the purpose of fast and accurate extraction of foot arch information. The method can be used to assist clinical diagnosis of flat foot and high arch foot, and contribute to quantative analysis on foot arch deformity and its pathogenesis study.

Key words: foot diagnosis; plantar pressure; principal component analysis (PCA); flat foot; high arch foot

平足与高弓足是临床上常见的下肢结构病变。平足导致足弓内测承压过大以及跟骨外翻,引起疼痛不适,损害患者行走与站立功能;高弓足则导致触地面积减小,前足与后足压力过大,严重时可引起足底软组织受损,并影响踝关节力线及稳定性^[1]。平足常被归为僵硬性平足与柔性平足两类,前者又称为结构性平足,无论足部是否在负重状态下,足弓都存在结构性塌陷,且伴随有距下关节活动度降低的情况;后者又称为功能性平足,足弓仅在负重时发生塌陷,可通过非手术保守治疗获得较好的治疗效果。临床上,95%以上的平足患者都属于柔性平足,通过及时诊断和保守治疗常可以达到较好的矫治效果^[2]。

在临床实践中,目前判断是否为平足的主要方法聚焦于足内侧纵弓。常用的判断依据包括足弓高度、舟骨下降试验、足印指数法和X线片。足弓高度通过内侧纵弓软组织最高点与地面的距离的测定进行判别^[3]。舟骨下降试验获取足舟状骨在负重与非负重状态下的高度变化,其与足部的旋前程度具有显著的相关性,也常被用于平足诊断^[4]。足印指数法具有可重复性高和易于操作的特点,实践中常通过一种着墨的设备来采集足印^[5]。近年来,随着薄膜阵列式压力传感器的发展,足底压力采集系统也被用于采集足印并判断足弓形态。尽管数据采集方法各异,目前对足印进行足弓判定的最常用方法是计算足弓指数(arch index, AI)。AI将获得的足印沿着足长方向分为3个面积相等的区域,以此来计算被试者足弓畸形的严重程度^[6]。

尽管通过AI判断平足具备一定的准确性,但其在原理上仍依赖于测量足印形状及面积的精

度^[7]。然而,目前高精度足底压力传感器成本较高。例如:美国Tekscan公司MatScan™系统、德国Novel公司pedar-X系统、比利时RSscan公司FootScan系统等足压检测设备价格都在10万元以上^[8]。此外,数据精度提升对数据采集系统的硬件要求也会较高,直接导致目前基于足底压力采集系统的足弓判定系统难以普及。目前,临床上医生常使用负重位X线摄片,根据X线片上特殊角度的测量进行足弓的判断和评估。但该方法常受限於医疗机构和专业人员,并伴有一定辐射,故很难用于日常足弓异常筛查。

根据平足与高弓足临床量化评估的要求,迫切需要一种经济、快速且准确的足弓异常智能检测方法来辅助高效的临床决策。本文引入足压数据主成分分析(principal component analysis, PCA)方法,根据足压分布数据几何与数值上的特征,实现对足弓形态的智能快速检测。同时,本文设计了实验,以验证软硬件系统功能和足弓形态判定结果的准确性,以期对临床诊断起到相应的辅助作用。

1 方法

1.1 系统设计及足压数据准确性验证

硬件系统由压阻式薄膜压力传感器和阵列数据采集电路组成。其中,传感器厚度约为0.5 mm,阵列规格为44行×52列,共计2 288个独立传感单元,覆盖约40 cm×40 cm测量面积。下位机电路板主要由1个主控芯片和12个LM324芯片、8个74HC4052芯片以及7个74HC4051芯片组成,可实现压力数据的采集、处理、传输。传感器通过4股FPC排线与电路板连接用于采集原始数据,并引出

USB 端口线与计算机上位机相连,用于通过计算机供电,并向上位机进行数据传输。本系统采用 Qt5 框架构建上位机软件与交互界面,实现站立状态下对受试者足底持续采集足底压力分布数据,系统采样频率为 15 Hz。整套硬件系统价格为 1 万元以下,较商用系统具有较好的可推广性。

本系统采集的原始足底压力分布数据存在噪声(离群点噪声),且分辨率较低[见图 1(a)]。首

先,通过对其进行滤波与插值的预处理,获得质量较高的足压数据[见图 1(b)],再采用泛洪算法(flood fill)^[9],从含有传感器硬件椒盐噪声的原始数据中提取面积超过噪声阈值的足压数据岛^[10]。经实验可得,面积阈值为 3 个点时,可在滤除噪声的同时对足印信息产生较小影响。随后,通过 Lanczos 二次插值提高了数据的分辨率^[11],获得较高质量的足底压力分布云图[见图 1(c)]。

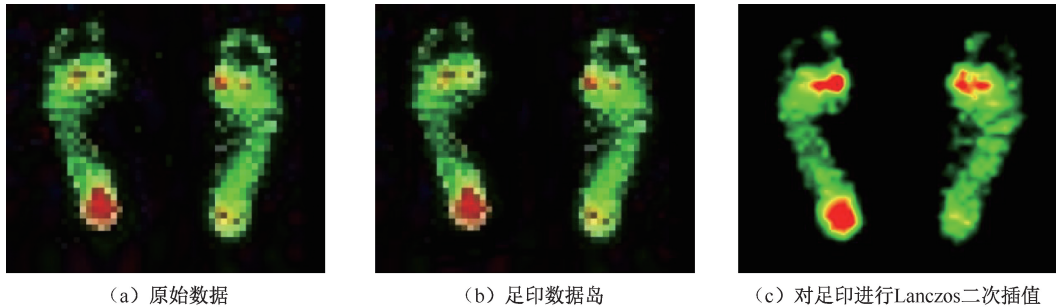


图1 足压数据预处理流程

Fig.1 Flow map of the preprocess on plantar pressure data (a) Raw data, (b) Footprint data island, (c) Lanczos interpolation on the footprint

为了验证本系统采集的压力数据的准确性,将商用足底压力分布采集系统作为标准与本系统进行对比实验,并对两个系统的数据进行 Pearson 相关性分析。足压采集时,受试者脱去鞋子,静止站立于传感器上 5 s 以上。本系统采用的传感器为柔性薄膜式,故将该传感器叠加在商用系统表面(见图 2),实现对同一被试进行双系统同步测试,能有效控制变量进行准确性对比实验。本文选用的商用足底压力分布采集系统量程为 3 kg/cm^2 ,传感器密度为 1 个/cm^2 ,采样频率为 100 Hz,有效测量面

积为 $40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 。

1.2 中足区域提取和计算方法

1.2.1 足印分区方法

足弓计算需有效获取足印的中足区域,既要足印沿某个方向进行合理的分段,客观上要求确立足印的长轴线,并在轴线上依据一定比例作出与轴线垂直的前中足分割线和中后足分割线。目前,临床上常以跟骨中心点与第 2 跖趾关节的连线作为足轴线,但是人工测定方法非常依赖操作人员的专业性和临床经验^[12]。

本文采用一种基于 PCA 拟合获得足轴线的方法,该方法的核心是通过对方差矩阵进行特征分解,以获得采集的足底压力分布数据的特征向量及其特征值^[13]。将足印数据中各点的横纵坐标作为 1 个样本,取所有点的平均坐标,即为足印的几何中心(center of geometry, COG)。首先,将坐标轴中心移到足印 COG 处,然后采用不断旋转坐标轴的方式,使足印数据在 C_1 轴上的方差达到最大值。此时, C_1 即为第 1 主成分,即为该足印的长轴线方向 Ax 。与最小二乘法(least squares method, LSM)类似^[14],PCA 也是通过求取到各数据点的“距离”最小的直线,然而在 LSM 中关注各点到目标直线沿垂直于 x 轴方向的距离,在 PCA 中关注各点到目标直

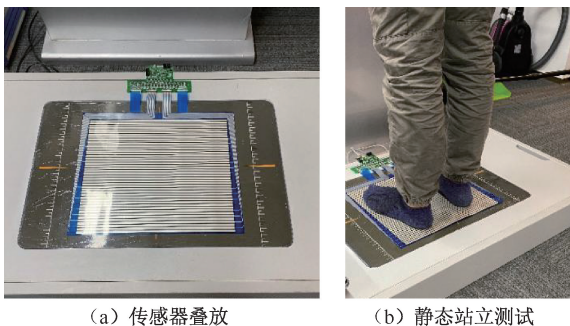


图2 传感器叠加对比实验示意图

Fig.2 Schematic for the overlying controlled experiment

(a) Stacking of the sensors, (b) Static standing experiment

线的垂直距离。因此,PCA 拟合得到的轴线对坐标轴方向不敏感,可以对任意朝向采集的足底压力数据进行准确的拟合,即数据采集中不需要对患者的站立位置和双足朝向进行限定。当足轴线位置确立后,即确定了足印的朝向,从而确定前足、中足与后足区域的位置。

由于 PCA 算法无法利用构成足印的各点之间的结构信息,故虽然可以由此确定足印图形的整体朝向,但是具有进一步减小信息熵的可能。针对这个问题,本文提出了一种在 PCA 基础上进行修正的方法,具体步骤如下:将 PCA 拟合得到的结果作为足部大致朝向,据此进行前后足的粗略划分,随后确定前足与后足的内外侧最宽位置,而后再将前足与后足的最宽位置截线的中点相连,以获得修正的足轴线。该方法意图根据足印的外形特征(前后足最宽处)分析得出跖骨列与跟骨的两端,并据此估计跟骨中心点与第 2 跖趾关节的位置,从而实现更接近临床人工拟合结果的自动化足轴线拟合。

1.2.2 足轴线拟合准确度实验 将 PCA 拟合得到的足轴线、基于 PCA 并进行修正后的足轴线与根据临床方法人工标注的足轴线进行对比,求取两条足轴线的夹角与双向 Hausdorff 距离。压力采集得到的足印基本完整地包含足跟与跖骨区域的投影,取跟骨与跖骨区域的中心点连线作为人工标注的足轴线方向,并延伸至足印的边缘。Hausdorff 距离则度量了两条曲线的相似度,值越小则相似度越高^[15]。令 A 与 B 为通过两种方法获得的轴线, a 与 b 为两轴线上任一点,则双向 Hausdorff 距离 $H(A, B)$ 为:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (1)$$

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \quad (2)$$

1.3 足弓判定算法

1.3.1 平足与高弓足诊断方法 足弓形态和中足区域与地面的接触特征密切相关。若接触部分占比过小或没有接触部分,则说明有高弓足的倾向;反之,若占比过大,则有平足倾向。为了快速而较准确地进行这一占比的度量,本系统通过计算中足触地部分的宽度与中足整体宽度的比值来近似足弓的倾向。

中足触地部分宽度 l_1 可通过作足轴线的中垂线,并计算该直线与足印相交部分的长度来确定。

而中足整体宽度可以视为中足在水平面上的投影,可使用足印的凸包络线来近似。在数据插值基础上,通过 Graham 扫描算法(Graham's algorithm)求得凸包络线(即将整个足印包括在内的面积最小的凸多边形)^[16]。随后,使用与中足触地部分相同的计算方法求得其中足宽度 l_2 。最后,计算中足弓系数 λ_{arch} 进行足弓诊断:

$$\lambda_{\text{arch}} = l_1 / l_2 \quad (3)$$

若 $\lambda_{\text{arch}} > \lambda_{\text{flat-foot}}$,即足弓处足印过宽,则判断被试为平足;若 $\lambda_{\text{arch}} < \lambda_{\text{high-arch}}$,即足弓处足印过窄或缺失,则判断被试为高弓足;其他情况下,判断被试为正常足弓。本算法流程图如图 3 所示。

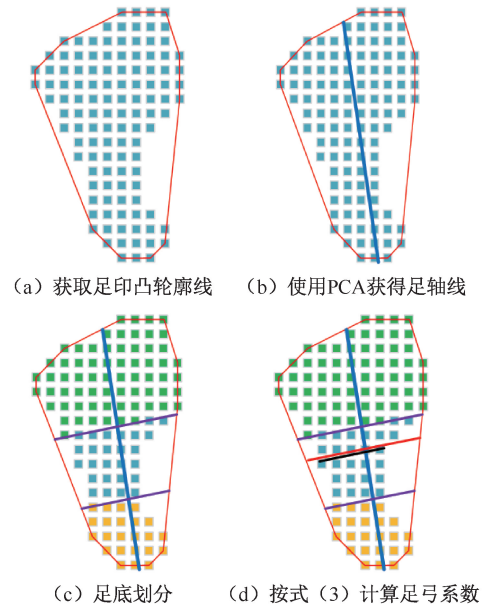


图3 软件算法流程图

Fig.3 Flow map of the algorithm (a) Convex hull figure of the footprint generated with Graham's scan, (b) Axis of the footprint generated with PCA, (c) Foot segmentation, (d) Calculation of the arch coefficient according to formula (3)

1.3.2 足弓诊断功能准确性验证实验 招募 9 名受试者(男性 7 名,女性 2 名),年龄 (24.33 ± 0.82) 岁,身高 (173.89 ± 6.77) cm,体重 (68.22 ± 7.66) kg,由复旦大学附属华山医院足踝外科主治医师以 X 线片下的多个骨性特征为依据,诊断为平足、高弓足与正常足弓的志愿者各 3 人。为了验证足弓判定算法的有效性,将本系统诊断结果与临床诊断结果进行对比,根据两种判定结果一致性来验证本系统临床足弓诊断功能的准确性。

2 结果

2.1 压力数据准确性实验结果

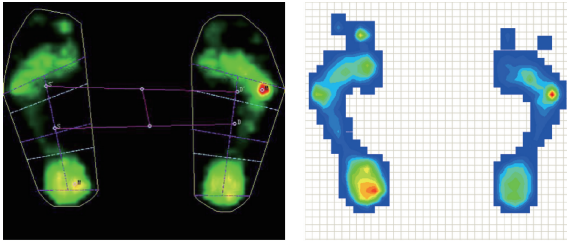
将本研究中的诊断系统与商用压力分布采集设备的数据进行对比分析,结果表明,两种设备采

表1 不同系统静态足压测试数据对比

Tab.1 Comparison of static plantar pressure test data from different systems

参数	诊断系统	商用压力分布采集设备	相关系数	偏差/%
总压力/kg	70.736±3.422	75.170±0.884	0.87	5.899
最大压强/(g·cm ⁻²)	1805±50.469	1612.545±37.750	0.76	-11.935
平均压强/(g·cm ⁻²)	317.172±9.731	362.205±5.081	0.23	12.433
接触面积/cm ²	214.092±8.254	207.545±1.440	0.43	-3.154
COP <i>x</i> 分量/cm	27.008±0.083	26.998±0.165	0.75	0.037
COP <i>y</i> 分量/cm	21.039±0.134	21.073±0.069	0.69	0.161

如图4所示,两套系统在足印形态及压力的分布特征上呈现较好的一致性。其中,接触面积的偏差约为3.1%,而COP位置也与商用设备基本吻合。但与商用采集设备相比,本研究中采用的压力传感器仍存在一定非线性误差,其中最大压强与平均压强略高于10%。考虑到本方法中对足弓情况的判断基于足印的形态特征,故认为本系统基本可满足后续足弓计算的准确性要求。



(a) 诊断系统

(b) 商用系统

图4 不同系统获得的站立条件下足底压力分布

Fig. 4 Plantar pressure distributions under standing obtained by different systems (a) The diagnosis system, (b) The commercial system

2.2 足长轴线计算结果

基于PCA和修正PCA算法的两种拟合方法得到的足轴线如图5所示,其中蓝线、品红线分别为PCA、修正算法的拟合结果。

两种拟合算法的结果都与按临床方法确定的足轴线十分接近,角度偏差小于2.5°,且双向Hausdorff距离小于9 mm,表明在足印内所得足轴线与参照的轴线上任意点与另一轴线距离不超过9 mm。基于修正PCA算法获得的足轴线更接近临

集的总压力、平均压强、最大压强、接触面积以及压力中心(center of pressure, COP)*x*与*y*分量均具有正相关性,且在足印形态及压力的分布特征上具有较好的一致性(见表1)。

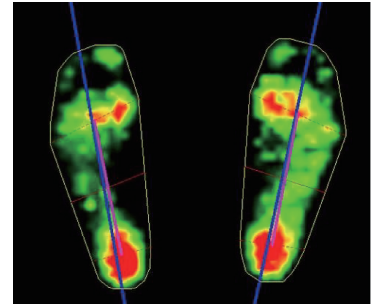


图5 足轴线拟合结果

Fig.5 Fitting images of foot axis

床定义的足长轴线,其角度偏差小于1°。该结果表明,基于修正PCA算法的足轴线拟合方法对足底分区具有更高的可靠性。

表2 轴线拟合比较

Tab.2 Comparison of axis fitting

轴线种类	夹角/(°)	双向 Hausdorff 距离/mm
PCA 算法	2.23±0.70	8.57±3.77
修正 PCA 算法	0.98±0.56	4.51±4.14

2.3 临床足弓诊断准确性验证实验

结果表明,本实验纳入的3类人群,即平足、高弓足患者以及正常足弓,足弓诊断准确性均达到88%以上,故认为本文研发的智能足弓诊断算法与临床诊断方法能有较好吻合度(见表3、图6)。实验验证了本文提出的足弓形态智能判断方法具有较高的准确率,对临床平足与高弓足诊断具有较高的参考价值。

表 3 系统诊断与临床诊断对照实验结果

Tab.3 Results of the controlled experiments between the system diagnosis and clinical diagnosis

性别	体重/kg	身高/cm	临床诊断	正确率/%	性别	体重/kg	身高/cm	临床诊断	正确率/%
男	68	178	平足	100.0	女	50	163	正常足弓	66.7
男	75	176	平足	66.7	男	70	178	高弓足	100.0
女	61	161	平足	100.0	男	76	180	高弓足	100.0
男	73	181	正常足弓	100.0	男	71	173	高弓足	100.0
男	70	175	正常足弓	100.0					

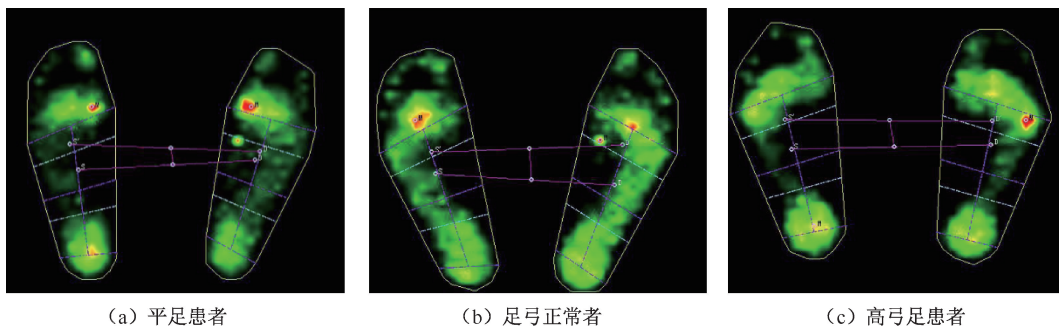


图 6 不同足弓形态受试者静态足压测试结果

Fig.6 Static plantar pressure test results from subjects with different arch shapes (a) Patient with flatfoot, (b) Volunteer with normal foot arch, (c) Patient with high arch foot

3 讨论与结论

本文设计实现了一种基于足压数据 PCA 的足弓形态智能评估方法。该方法首先使用 PCA 获得足部基准轴线,然后基于该轴线和足压分布数据的形态特征,快速计算接近临床定义的足长轴线,并对被检测的足部足弓情况进行评估。研究表明,与受试者的临床诊断结果进行对比,研发的足弓形态判定方法的综合准确率达到 92.6%。

相较于传统的足印分区方法,本文创新性地提出基于对足印 PCA 的足长轴线拟合方法,使拟合得到的足轴线十分接近根据临床经验手动确立的足轴线,两者的角度偏差小于 1° 。本文将 PCA 结果作为寻找骨性特征的依据,并利用该骨性特征确定修正后的足长轴线,提高了长轴计算的准确性和鲁棒性。此外,相较现有的商用足底压力采集系统,尽管本文采用的压力数据分辨率较低,但是基于修正的 PCA 方法在分辨率较低的足底压力数据中成功提取出足弓异常信息,且足弓判定综合准确率较高。因此,该方法有望在临床实践、社区检查或商业应用中普及,用于辅助平足与高弓足的快速筛查以及足弓畸形程度的量化分析研究。

本研究也存在一定的局限性。例如:对于足弓存在一定塌陷但未有明显中足触地(即中足压力未达到传感器灵敏度阈值)的轻度平足患者,仅从足印形态(即足部的触地部分)较难判断其平足畸形程度,可能造成漏诊。后续研究可考虑通过引入深度卷积神经网络技术,在触地足印的形态特征基础上,对压力分布信息进行分析。相对人工设置特征的提取方法,对深度学习模型的训练可以自动化地从数据中提取多层次的特征信息,从而发掘本研究中的算法还未能加以利用的足印形态深层信息,以期对足弓形态进行更准确地判断。另外,本文未验证对伴有其他足部畸形的患者的足弓评估有效性,后续可招募伴有马蹄足、拇外翻等足畸形的患者进行对比实验。

参考文献:

- [1] 宋礼文,向长城,邱达,等. 基于足底压力分布的足部运动特征提取[J]. 医用生物力学, 2021, 36(3): 431-436.
SONG LW, XIANG CC, QIU D, et al. Foot motion feature extraction based on plantar pressure distribution [J]. J Med Biomech, 2021, 36(3): 431-436.
- [2] CARR JB, YANG S, LATHER LA. Pediatric pes planus: A state-of-the-art review [J]. Pediatrics, 2016, 137(3):

- e20151230.
- [3] HAWES MR, NACHBAUER W, SOVAK D, *et al.* Footprint parameters as a measure of arch height [J]. *Foot Ankle*, 1992, 13(1): 22-26.
- [4] BRODY DM. Techniques in the evaluation and treatment of the injured runner [J]. *Orthop Clin North Am*, 1982, 13(3): 541-558.
- [5] QUEEN RM, MALL NA, HARDAKER WM, *et al.* Describing the medial longitudinal arch using footprint indices and a clinical grading system [J]. *Foot Ankle Int*, 2007, 28(4): 456-462.
- [6] CAVANAGH PR, RODGERS MM. The arch index: A useful measure from footprints [J]. *J Biomech*, 1987, 20: 547-551.
- [7] CHANG CH, CHEN YC, YANG WT, *et al.* Flatfoot diagnosis by a unique bimodal distribution of footprint index in children [J]. *PLoS One*, 2017, 9(12): e115808.
- [8] 祝光志. 基于足底压力检测装置的数据分析系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [9] TORBERT S. *Applied computer science* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2016: 158.
- [10] ROSIN P, COLLOMOSSE J. *Image and video-based artistic stylisation* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 92.
- [11] TURKOWSKI K, GABRIEL S. Graphics gems: “filters for common resampling tasks” [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1990: 147-165.
- [12] SALTZMAN C, ANDERSON RB. *Mann’s surgery of the foot and ankle*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013: 76-77.
- [13] JOLLIFFE IT. *Principal component analysis* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986: 487.
- [14] CHARNES A, FROME EL, YU PL. The equivalence of generalized least squares and maximum likelihood estimates in the exponential family [J]. *J Am Stat Assoc*, 1976, 71(353): 169-171.
- [15] CIGNONI P, ROCCHINI C, SCOPIGNO R. Metro: Measuring error on simplified surfaces [J]. *Comput Graph Forum*, 1998, 17(2): 167-174.
- [16] GRAHAM RL. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set [J]. *Inform Process Lett*, 1972, 1(4): 132-133
- [17] 朱婷, 马霞, 翟华, 等. 踝关节不同应力位的动态足底压力特征[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(4): 342-348.
- ZHU T, MA X, ZHAI H, *et al.* Dynamic plantar pressure features of ankle joints at different stress positions [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(4): 342-348.