

文章编号:1004-7220(2021)03-0431-06

基于足底压力分布的足部运动特征提取

宋礼文^{a,b}, 向长城^{a,b}, 邱达^{a,c}, 陈世强^{a,c}

(湖北民族大学 a. 超轻弹性体材料绿色制造国家民委重点实验室; b. 数学与统计学院;
c. 新材料与机电工程学院, 湖北恩施 445000)

摘要:目的 分析足底压力分布的统计学行为,提取足部运动的特征,为步态识别研究用于医疗临床诊断、康复训练和大众健康等提供参考。方法 通过对采集到的足部压力数据进行预处理,并对数据进行统计分析,实现足迹重构,并对足迹、分割区域以及各区域压力分布率进行比较分析,实现对足部运动特征的分解。结果 分区域对足底压力峰值进行分析比较,以不同区域压力峰值变化曲线的交叉点为依据,将足底区域分为脚趾、跖骨、足弓部、脚跟4个区域时,可准确地对足部运动特征进行提取。结论 利用足底压力峰值对足部运动特征进行提取,并将足部运动分为着地、整足接触、足跟离地和离地4个阶段。

关键词:步态识别;足底压力分布;区域分割;足迹重构;特征提取

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.03.021

Feature Extraction of Foot Movement Based on Plantar Pressure Distributions

SONG Liwen^{a,b}, XIANG Changcheng^{a,b}, QIU Da^{a,c}, CHEN Shiqiang^{a,c}

(a. Key Laboratory of Green Manufacturing of Super-Light Elastomer Materials of State Ethnic Affairs Commission; b. School of Mathematics and Statistics; c. School of Advanced Materials and Mechatronic Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei, China)

Abstract: Objective To analyze the statistical behavior of plantar pressure distribution, extract the characteristics of foot movement, and provide references for application of gait recognition in medical clinical diagnosis, rehabilitation training and public health. **Methods** The collected foot pressure data were preprocessed, statistical analysis on the data was performed, the footprint reconstruction was realized, and the pressure distribution rates of the footprints, segmented regions and each region were compared and analyzed, so as to decompose the foot motion characteristics. **Results** Based on the cross point of pressure peak curve in different regions, the plantar region was divided into toe region, metatarsal region, arch region and heel region, which could accurately extract the foot movement characteristics. **Conclusions** The peak plantar pressure is used to extract the characteristics of foot movement, which is divided into landing stage, whole foot contact stage, heel tiptoe stage and ground off stage.

Key words: gait recognition; plantar pressure distribution; region segmentation; footprint reconstruction; feature extraction

收稿日期:2020-07-15; 修回日期:2020-07-28

基金项目:恩施州科技计划项目(2019001062),超轻弹性体材料绿色制造国家民委重点实验室2020年度开放基金资助项目(PT092006)

通信作者:陈世强,教授,E-mail:1997013@hbmzu.edu.cn

足部运动是人体肢体运动最频繁的活动,通过足部运动特征分析并进行改善是康复医学研究领域有待突破的难题。足底压力分布是足部运动最直接的数据来源,它可以反映出人体在运动过程中足部结构、功能以及整个身体姿势的运动状况。许多研究者通过对足底压力分布进行分析、探索,并结合医学,达到改善人体活动以及预防疾病的目的,并设计出多样的足底压力信号采集分析系统和识别算法。

有研究对不同年龄段人体足部压力分布进行相关性分析和评价,但未能考虑行走时的速度因素^[1-3]。Booth等^[4]使用统计模型和参数映射对足底压力图像进行个性化分析。Mei等^[5]采用样本熵对4种足型的足底压力中心功能差异进行探索性研究。随着人们对足底压力的深入认识,研究者将足底压力与疾病紧密地联系起来。Shimoda等^[6]讨论前足关节成形术对类风湿关节炎患者术后1年内足底压力和步态的影响。Gnanasundaram等^[7]分析糖尿病患者步态变化,并实现了糖尿病足溃疡的早期风险标记。Verdu-Roman等^[8]借助临床和影像学技术,对改良型V形截骨术治疗中度外翻的足底压力进行改善。Benito-de-Pedro等^[9]探讨铁人三项运动员踝关节背屈和足底压力之间的关系。但上述研究只针对特殊人群与足部压力之间的关系进行比较分析。

随着科学技术的发展,学者们通过分析足底压力分布特征,研发出不同类型的足底压力信号采集系统以及识别算法。闻刚等^[10]克服传统静态数据的局限性,采用动态足底压力测量系统,研究不同运动速度下足底压力分布趋势。高敏等^[11]分析足底压力测量系统的影响因素和传感器在足底压力测量方面的性能,并对人体足底压力测量点和传感器测量区域进行讨论,设计出一套能够实现远程足部电子医疗诊断与监测的足底压力测量系统。有研究者基于LabVIEW、STM32系统进行分析,实现对足底压力的自动采集、处理和传输,以及足底压力信息的实时显示和存储,虽然精度高,但是价格昂贵、处理周期较长,只能在特定环境才能完成人体步态的测量分析,具有一定的局限性^[12-13]。

本文对足部运动特征进行提取,分析足底压力分布特征。首先对获取数据进行预处理,从统计学角度

分析压力,并采取整体和部分的方法对足迹和区域进行研究,实现对足部运动特征的提取。

1 材料与方法

1.1 研究对象及数据采集

为了准确划分足底相位,进行足底测力系统实验。实验过程中,选取24名不同年龄段、性别健康志愿者(无足部疾病和身体障碍)进行足底压力进行测量,测试对象进行平地行走状态的步态行走实验,并在行走过程中保持步速近似均匀。对每名测试者左右脚进行24次数据采集,同时记录行走速度、步幅和步幅时间(见表1)。

足底压力测量采用长度0.5 m的Footscan[®]板,并置于装有压力传感器Kistler测力板上采集,与RS scan Footscan[®] 3D接口盒同步,以便收集测试者两个后续的足迹,数据均在500 Hz频率下测量。为了保证数据的有效性,测试者以一定速度赤脚行走在测力板上,先进行3次预测试。在测试者行走速度趋于稳定同时满足足跟先触地的基本原则情况下,对足底压力进行测量。将收集在Footscan[®]软件中的压力数据导出,然后使用MATLAB R2016a转换为ini格式。从ini格式数据中提取足底压力特征矩阵,并保存为mat格式的文件,1个mat格式文件对应1位测试者的压力数据矩阵。mat压力数据矩阵定义如下:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_k \end{bmatrix}$$

式中: $A_i = (a_{i1} \cdots a_{ij} \cdots a_{in})$, a_{ij} 表示第j个采样点的数据。

1.2 数据预处理

在数据采集和传输过程中,由于外界环境干扰和本身仪器的影响,会产生各种噪声,这些噪声对数据分析会产生不同程度的影响。因此,在进行噪声分析前,需要对数据进行去噪处理,减少数据的误差。本文采用Daubechies小波进行去噪。

1.3 峰值-均值计算

从足底开始落地到整只脚抬起的过程中,并将传感器采集的1次数据视为1个数据切片,每次数据

表1 测试者基本信息

Tab.1 Basic information of the subjects

年龄段	性别	身高	体质量/kg	鞋尺码	步行速度/(km·h ⁻¹)		步长/mm		步幅时间/s	
					左	右	左	右	左	右
20~30	男	189.0	78.0	45.0	4.70	4.76	740.83	764.75	0.57	0.57
	男	188.0	71.0	42.0	4.92	4.89	755.88	745.46	0.55	0.54
	男	182.0	85.6	41.0	4.21	4.38	692.24	707.43	0.59	0.58
	女	167.5	75.6	39.0	5.55	5.48	749.91	757.52	0.49	0.49
	女	169.5	63.8	39.5	4.98	5.03	722.46	732.25	0.52	0.52
	女	162.0	56.6	37.0	4.84	4.91	685.45	693.08	0.51	0.51
31~40	男	194.0	103.2	44.0	4.03	3.92	679.54	678.79	0.60	0.62
	男	195.0	88.4	42.0	4.87	4.82	746.54	726.70	0.55	0.54
	男	183.0	85.0	43.0	4.56	4.58	735.29	723.70	0.58	0.56
	女	174.5	65.6	39.5	4.86	4.89	718.54	716.04	0.53	0.52
	女	170.0	66.1	39.0	5.48	5.68	731.00	749.33	0.48	0.47
	女	161.0	87.0	38.0	4.99	4.95	635.95	641.41	0.45	0.46
41~50	男	175.0	63.0	43.0	4.88	4.92	704.16	705.54	0.51	0.51
	男	184.0	84.0	44.0	5.29	5.02	767.66	715.95	0.52	0.51
	男	184.0	84.0	43.0	4.60	4.85	768.29	781.91	0.60	0.58
	女	177.0	76.8	41.0	6.02	6.10	792.70	786.04	0.47	0.46
	女	168.0	70.0	38.0	5.71	5.75	725.29	723.37	0.45	0.45
	女	171.5	74.6	39.0	4.11	4.30	615.33	640.62	0.53	0.53
51~70	男	179.0	64.2	38.5	5.09	5.10	771.25	762.54	0.54	0.53
	男	181.5	84.2	43.5	4.54	4.57	740.79	736.04	0.58	0.57
	男	181.1	90.4	44.5	4.80	4.66	702.04	691.20	0.52	0.53
	女	159.0	50.6	36.5	4.14	4.17	562.45	583.66	0.48	0.50
	女	173.5	72.0	37.5	4.08	4.07	602.95	595.66	0.53	0.52
	女	161.0	84.4	40.0	4.17	4.10	638.87	627.83	0.55	0.55

据切片大小为 $m \times n$, 设预处理后的足底压力原始数据为 N 个切片, 以 M 个切片为 1 个单位, 得到 N/M 个切片数据, 并将其转换成矩阵。设原始压力数据为矩阵 $A_{m \times n}$, 其中 m, n 分别为矩阵的长度和宽度, 则压力峰值的最大值和均值可由以下公式计算得到:

$$A_{\max} = \max(\max(A(:, n))) \quad (1)$$

$$A_{\text{avg}} = \frac{\sum_{j=1}^m A(j, \sum_{i=1}^n A(:, i))}{\text{num}(A(:, n)) * \text{num}(A(m, :))} \quad (2)$$

式中: $A(:, n)$ 表示矩阵 $A_{m \times n}$ 的所有列, $A(m, :)$ 表示矩阵 $A_{m \times n}$ 的所有行, $\max(*)$ 表示最大值, $\text{num}(*)$ 表示数量。

1.4 足底足迹重构

数据进行预处理后, 为了更加形象地对足底压力数据进行分析, 将压力数据矩阵 $A_{m \times n}$ 重构为足迹等高线图。以单脚数据为例, 从足底开始落地到整只脚抬起的过程中, 共采集 345 组数据。把这些数据视为 345 个切片, 将整理后的数据进行仿真实验,

并将足底足迹进行重构。实验中以 5 切片为 1 个阶段进行重构, 得到 69 个不同切片的足迹图 (见图 1), 同时对每个切片的峰值点进行定位。由于每个切片的峰值点不止 1 个, 本文采用峰值点均值坐标作为 1 个切片的峰值点, 并拟合出图 2 所示的单脚足迹压力 (center of pressure, COP) 变化曲线。

1.5 足底区域划分

采集到的图像在计算机中以矩阵形式存储, 为进一步对足底足迹进行特征提取, 二值图像分析最重要的方法是连通区域标记, 它是所有二值图像分析的基础。通过对二值图像中白色像素 (目标) 的标记, 让每个单独的连通区域形成 1 个被标识的块。进一步, 就可以获取这些块的轮廓, 从而对足底各个区域进行划分。在处理时, 将 5 个脚趾区域进行连接, 形成 1 个区域, 进而得到矩阵中的 4 个有效块, 即脚趾块 (metatarsal toe, MT)、跖骨块 (metatarsal head, MTH)、足弓部块 (middle foot, MF) 和脚跟块 (middle heel, MH)。

对不同性别和年龄测试者足部不同区域的数

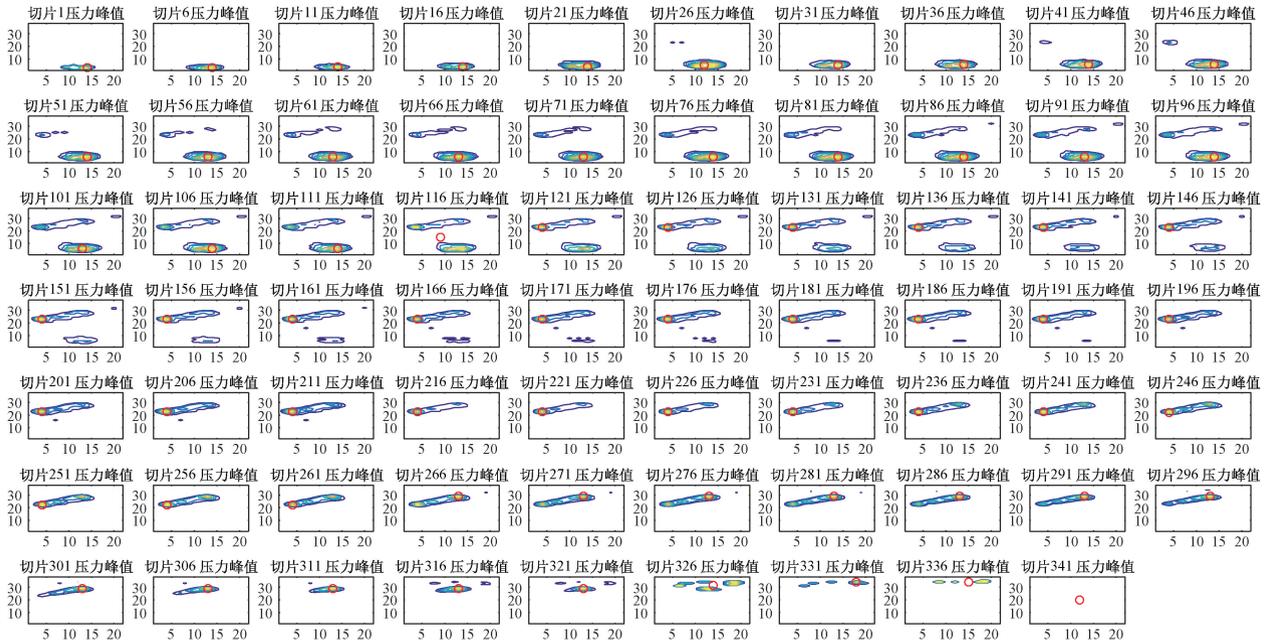


图1 单脚足迹切片分割及峰值点标记

Fig.1 Slice segmentation and peak point marking of single foot footprint

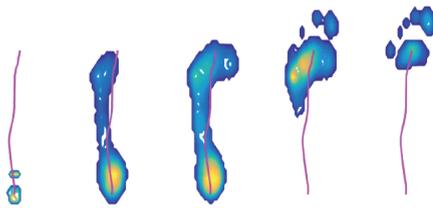


图2 单脚足迹压力变化曲线

Fig.2 Pressure change curve of single foot footprint

据进行统计分析,并将本文提出的方法与文献[14-16]提出的分区域方法进行比较分析:① 1个区域,即整个足底;② 3个区域,即脚趾区域、跖骨区域、脚跟区域;③ 4个区域,即脚趾区域、跖骨区域、足弓部区域、脚跟区域;④ 10个区域,即大脚趾区域、第2~5脚趾区域、1~5跖骨区域、足弓部区域、脚跟

外侧区域、脚跟内侧区域。对整体和各区域峰值压力变化进行整合,绘制压力峰值变化曲线。

2 结果与讨论

2.1 足底区域分析

综合图3中各区域压力峰值变化趋势可知,根据3个区域,无法得出足部在运动时足底完全落地的阶段;根据10个区域,由于数据的冗余,导致足部运动阶段的提取困难。

(1) 脚跟区域从一开始就落地,在67切片时,脚跟压力峰值减小,此时其他区域已经落地,压力重心转移;在214切片时,脚跟压力为0,此时脚跟开始离地抬起。

(2) 足弓部区域在切片30开始落地,在脚跟离

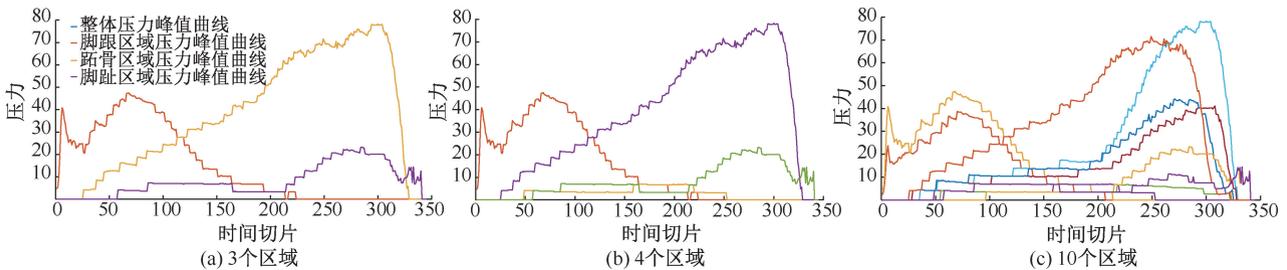


图3 单脚整体和各区域压力峰值变化

Fig.3 Pressure peak variation of single leg and each region (a) In three regions, (b) In four regions, (c) In ten regions

地时压力峰值最大;在切片 271 时,足弓部压力峰值为 0,此时足弓部已离地抬起。

(3) 跖骨区域在 25 切片时开始落地,且压力峰值不断增大,达到最大压力峰值,即切片 303 时,此时足部处于踮起状态;在切片 336 时,跖骨区域压力峰值为 0,此时只有脚趾着地。

(4) 脚趾区域在切片 57 时开始落地,达到最大压力峰值,即切片 287 时,此时足部处于踮起状态,在切片 341 时,脚趾离地,此时整只脚的压力峰值为

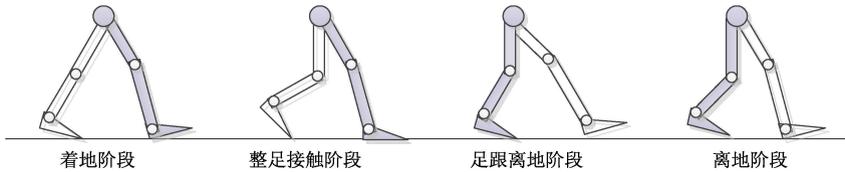


图 4 足部运动分解

Fig.4 Foot motion decomposition

上述 4 个阶段的判断指标如下:

着地阶段 $p(\text{MH}) \neq 0, p(\text{MT}) = 0, p(\text{MTH}) = 0,$
 $p(\text{MF}) = 0$

整足接触阶段 $p(\text{MH}) \neq 0, p(\text{MT}) = 0 \rightarrow$
 $p(\text{MT}) \neq 0, p(\text{MTH}) = 0 \rightarrow p(\text{MTH}) \neq 0, p(\text{MF}) =$
 $0 \rightarrow p(\text{MF}) \neq 0$

足跟离地阶段 $p(\text{MTH}) > p(\text{MT}) > p(\text{MF}) >$
 $p(\text{MH}) = 0$

离地阶段 $p(\text{MH}) = p(\text{MT}) = p(\text{MF}) = p(\text{MTH}) = 0$

以上分解结果符合正常人行走时足部运动规律,故足底压力可以作为肢体运动预测的一项指标。

2.3 区域分布

各区域压力分布所占比例计算公式如下:

$$r_i = \frac{\text{reg}_i}{\text{reg}_{\text{all}}}, i = \{x | x \in \{\text{MH}, \text{MT}, \text{MTH}, \text{MF}\}\} \quad (3)$$

式中: reg_i 代表区域 i 在支撑期所占的切片数, reg_{all} 代表切片总数, r_i 代表区域 i 所占比例。根据本文提出的足底区域划分方法,计算各区域所占的切片比例,足部足底压力主要分布在 MT、MTH、MF、MH 4 个区域,由式(3)计算可得,这 4 个区域压力分布所占比例分别为 36.23%、84.06%、15.94%、56.52%。

在第①种分类中,将整个足底作为数据采集区

0,处于离地状态。

2.2 足部运动特征提取

研究表明,人体正常行走时,1 个完整的步态周期主要包括支撑相和摆动相两部分,而支撑相可以细分为足跟着地期、负荷反应期和足尖离地期^[17]。通过分析不同年龄和性别峰值压力变化曲线可知,年龄和性别对各区域峰值压力交叉点没有影响。对足底压力峰值进行足部运动特征提取,并将足部运动分为 4 个阶段(见图 4)。

域,虽然传感器数量较少,但由于足底压力不完全分布在整个足底,故在采集过程中会出现数据的冗余,增加了分析复杂度;在第②种分类中,足底大部分数据能够采集到,但是足弓部区域的数据未采集到,这对肢体运动准确性的预测造成误差,虽然足弓部区域所占比例较少,但是足弓部区域数据是判断整个足底落地的关键区域;在第④种分类中,虽然数据的采集精度较高,但使用的传感器数量较多,对整体舒适度会造成一定影响,同时也增加了分析复杂度。采用第③种分类方法,既能满足足底数据采集的准确性要求,又能减少数据冗余量以及分析复杂度。

3 结论

本文提出一种基于足底压力分布的足部运动特征提取算法,解决了足部运动特征提取的问题。本文结果表明,人体足部运动特征可以分解为 4 个有效阶段,即着地阶段、整足接触阶段、足跟离地阶段、离地阶段。这项工作的进展为步态识别研究、分类比较、健康评价,以及后续进行医疗临床诊断、康复训练和大众健康等研究提供基础。

参考文献:

- [1] LOVRO S, MARIO K, MARTIN Z. Association between the levels of physical activity and plantar pressure in 6-14-

- year-old children [J]. Peer J, 2020, 8(8): e8551.
- [2] 马新颖, 满喜. 不同年龄段人群行走足底压力特征分析[J]. 医用生物力学, 2020, 35(1): 108-113.
MA XY, MAN X. Analysis on characteristics of plantar pressures in different age groups during walking [J]. J Med Biomech, 2020, 35(1): 108-113.
- [3] SANCHIS-SANCHIS R, BLASCO-LAFARGA C, ENCARNACIÓN-MARTÍNEZ A, *et al.* Changes in plantar pressure and spatiotemporal parameters during gait in older adults after two different training programs [J]. Gait Posture, 2020, 77: 250-256.
- [4] BOOTH BG, HOEFNAGELS E, HUYSMANS T, *et al.* PAPPI: Personalized analysis of plantar pressure images using statistical modelling and parametric mapping [J]. PLoS One, 2020, 15(2): e0229685.
- [5] MEI ZY, IVANOV K, ZHAO GR, *et al.* Correction to: An explorative investigation of functional differences in plantar center of pressure of four foot types using sample entropy method [J]. Med Biol Eng Comput, 2017, 55 (4): 537-548.
- [6] SHIMODA H, MOCHIDA Y, ORITSU H, *et al.* Effects of forefoot arthroplasty on plantar pressure, pain, gait and disability in rheumatoid arthritis [J]. Mod Rheumatol, 2019, 30(2): 1-4.
- [7] GNANASUNDARAM S, RAMALINGAM P, NATH B, *et al.* Gait changes in persons with diabetes: Early risk marker for diabetic foot ulcer [J]. Foot Ankle Surg, 2020, 26(2): 163-168.
- [8] VERDU-ROMAN C, SANZ-REIG J, MARTINEZ-GIMENEZ E, *et al.* Plantar pressure improvement in moderate hallux valgus with modified chevron osteotomy: Clinical and radiographic outcomes [J]. Foot Ankle Surg, 2020, 26 (2): 205-208.
- [9] BENITO-DE-PEDRO M, BECERRO-DE-BENGOA-VALLEJO R, ELENA LOSA-IGLESIAS M, *et al.* Effectiveness of deep dry needling vs ischemic compression in the latent myofascial trigger points of the shortened triceps surae from triathletes on ankle dorsiflexion, dynamic, and static plantar pressure distribution: A clinical trial [J]. Pain Med, 2020, 21(2): e172-e181.
- [10] 闻刚, 胡志刚, 杜喆, 等. 动态足底压力测量系统研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 19-23.
- [11] 高敏, 张一帆, 洪成雨, 等. 柔性传感器在足底压力测量系统中的应用[J]. 服装学报, 2018, 3(4): 301-307.
- [12] 岳尚军. 基于 LabVIEW 的压力分布测量及分析系统的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [13] 郭彦青, 孟烈刚, 刘璐. 基于 STM32 的足底压力测量系统 [J]. 计量与测试技术, 2015, 42(7): 9-11.
- [14] 乔刚, 张建国, 刘合荣. 不同年龄健康人平地行走时足底压力对比分析[J]. 天津科技大学学报, 2012, 27(3): 55-59.
- [15] ZHANG Q, WANG YL, XIA Y, *et al.* A low-cost and highly integrated sensing insole for plantar pressure measurement [J]. Sensing Bio Sensing Res, 2019, 26: 100298-100305.
- [16] 郝卫亚, 陈严, 胡水清. 儿童倒走足底压力的分布特征研究 [J]. 力学与实践, 2008, 30(3): 56-59.
- [17] 贾山, 路新亮, 韩亚丽, 等. 在摆动相中用于下肢外骨骼跟踪人体踝关节轨迹的方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 87-92.