

文章编号: 1004-7220(2021)01-0096-06

# 基于统计形状模型的三维足形状建模

梅齐昌<sup>1,2</sup>, 高自翔<sup>1</sup>, Justin FERNANDEZ<sup>1,2</sup>, 顾耀东<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211; 2. Auckland Bioengineering Institute, University of Auckland, Auckland 1010, New Zealand)

**摘要:**目的 构建足的三维统计形状模型(statistical shape model, SSM), 揭示足形状的三维变化特征。方法 50名中国青年男性正常足数据用于三维统计形状建模, 通过足面网格配准、点对齐及主成分(principal component, PC)降维分析等步骤, 获得平均足形态及在各PC维度标准差等参数化的足形态。结果 通过PC降维分析, 三维足型主要在长短及宽窄(PC1, 48.01%)、足弓高度及足背厚度(PC2, 11.38%)及大脚趾展收(PC3, 7.48%)等维度变化。结论 通过构建参数化的足三维SSM, 可运用至基于该人群的鞋楦制作、鞋垫定制及临床足病快速诊断等应用。

**关键词:**统计形状建模; 足形态; 鞋楦; 主成分分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.016

## Three-Dimensional Foot Shape Modelling Based on Statistical Shape Model

MEI Qichang<sup>1,2</sup>, GAO Zixiang<sup>1</sup>, Justin FERNANDEZ<sup>1,2</sup>, GU Yaodong<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Auckland Bioengineering Institute, University of Auckland, Auckland 1010, New Zealand)

**Abstract: Objective** To establish the three-dimensional (3D) statistical shape model (SSM) of the foot, so as to reveal the 3D foot shape variations. **Methods** Foot data from 50 normal Chinese young males were used for 3D statistical shape modelling. Steps, including mesh registration of foot surface, axis alignment and principal component (PC) analysis (dimension reduction), were performed to obtain the parameterized foot shape (mean shape and standard deviation of PC). **Results** Through the principal component analysis (PCA), the 3D foot shape varied in the length and width (PC1, 48.01%), arch and dorsal height (PC2, 11.38%), and hallux abduction-adduction position (PC3, 7.48%). **Conclusions** Based on the parameterized 3D foot SSM, these datasets can be applied into the population-based shoe last manufacture, orthotics customization and quick diagnosis of foot disorders in clinic.

**Key words:** statistical shape modelling; foot shape; shoe last; principal component analysis (PCA)

统计形状模型(statistical shape model, SSM)主要用于描述可变形物体的形态学变化<sup>[1-2]</sup>。当前,随着工程技术、计算机视觉与医学影像等科技的快速发展及跨学科应用,二维与三维统计形

状建模分析算法的不断优化及精准度的提高,统计形状建模技术已在很多领域开展应用<sup>[3-5]</sup>,例如:面部性别识别<sup>[6]</sup>、考古学数据复原<sup>[7]</sup>、脊柱二维数据向三维形态的配准<sup>[8]</sup>、构建可缩放且解剖

收稿日期:2019-12-04; 修回日期:2020-01-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(81772423),国家自然科学基金委与英国爱丁堡皇家科学院国际合作与交流项目(81911530253),中新政府博士研究生奖学金项目

通信作者:顾耀东,教授,博士生导师,E-mail:guyadong@hotmail.com

标志准确的三维参数化脊柱有限元模型用于快速评估并指导临床治疗<sup>[9]</sup>、三维肝脏分割手术临床指导<sup>[10]</sup>、骨骼与关节形态和功能间关联性评估。总结上述各相关研究与应用发现,其采用的基本流程大体相似:① 基于二维或三维扫描技术获取形态数据,而医学三维模型主要均源于CT/MRI 影像数据的重建;② 确定形态的标志点及参照形状,对该系列形状的物体作网面配准,常采用非刚体配准;③ 对该系列形状模型进行刚性点对齐;④ 对配准和对齐后面的形态进行主成分(principal component, PC)降维分析,获得平均形状模型及在各特征向量内变化量,以参数化三维数据集描述该形态模型。

足部是人体动力链与外界环境接触的始端,常存在形态和姿态的差异,故需要不同的鞋具及功能鞋垫以满足功能需求。本文基于三维统计建模分析中国男性三维足形状,以期为该方法在足部及鞋具生物力学研究中的应用提供参考。

## 1 对象与方法

### 1.1 测试对象

50 名中国男性志愿者,年龄( $22\pm 3.6$ )岁,身高( $1.73\pm 0.08$ ) m,体质量( $65.3\pm 4.1$ ) kg。本文的样本量满足统计形状建模的算法运算<sup>[13]</sup>。受试者入选标准包括:均无显著超重,无不同鞋具(着鞋或裸足)穿着习惯及长期特定运动可能对足型产生的适应性影响,且无任何足部及下肢畸形。受试者均明确测试的目的及流程,并签署相关知情说明书,研究所在单位伦理委员会批准该研究测试。

### 1.2 测试设备及流程

使用 Easy-Foot-Scan 三维足型扫描仪(Ortho

Baltic 公司,立陶宛),依据本课题组前期已发表的测试流程<sup>[11-12]</sup>对三维表面足型进行扫描,设备分辨率为 1.0 mm、平滑系数设定在 30。测试时,受试者双脚与肩同宽、眼睛平视前方使身体重心平均在双侧,受试者自选左、右足的先后扫描顺序,依次完成双侧足型扫描。

### 1.3 数据处理及分析

选取右脚足型作分析,将扫描获取的原始足型数据(esfa 格式)在扫描仪自带 Foot3D 软件中完成降噪,并另存为通用的三维数据 STL 格式,使用 HyperMesh 2017 在三维足型小腿部位的后跟上端 150 mm 处作水平面( $x-y$  平面)切割并封口处理[见图 1(a)~(c)]。

数据的配准、对齐及 PC 降维分析在本课题组前期股骨三维形状统计模型的相关研究中有详细介绍<sup>[13-14]</sup>,其简要关键步骤如下:

首先,在 50 个三维足型数据[见图 2(a)]中通过 HyperMesh 2017 软件检查网面质量挑选 1 个三维数据做参照形状网面,将另外 49 个足型按照该网面作非刚性配准[见图 2(b)、(c)],即用相同的网面呈现各足型形状,获得目标足型。该步骤依据迭代最近点(iterative closet point, ICP)算法及最小二乘原理,将目标足型和参照形状逐渐对齐,使两者形状网格中各最近节点间的距离最小<sup>[2-3,14]</sup>。

其次,对参照形状外的所有 49 个配准后的形状网面做刚性对准[见图 2(c)],依据广义普鲁克分析(generalized procrustes analysis, GPA)算法<sup>[13-16]</sup>,在保存形状特征的基础上,对网面各节点的坐标系及坐标原点进行转换,使所有模型均在相同坐标系内,即前后( $x$ )、内外( $y$ )及上下( $z$ );且各形态数据间标志点的距离最小。



图 1 三维足形态数据预处理示意图

Fig.1 Schematic for pre-processing foot 3D data (a) Shape generation, (b) Surface cutting, (c) Top-sealing

各三维足型网面的矢量矩阵可表述为  $Y$ 。其中,各标志点均用坐标点  $(x, y, z)$  表示,  $k$  为各形状模型矢量标志点总数。

$$Y = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_k, y_k, z_k)^T$$

最后,对所有 50 个足型数据进行训练,做主成分分析(principal component analysis, PCA)降维[见图 2(d)],通过数据降维将多个变量化为少数几个 PC,上述 PC 能够反映原始变量的大部分信息,通常表示为原始变量的某种线性组合;要求 PC 所含的信息不互相重叠,且互不相关。可用  $y$  描述该 50 个足型训练集中任何三维统计形态:

$$y = \bar{y} + \sum_{i=1}^{k-1} a_i b_i$$

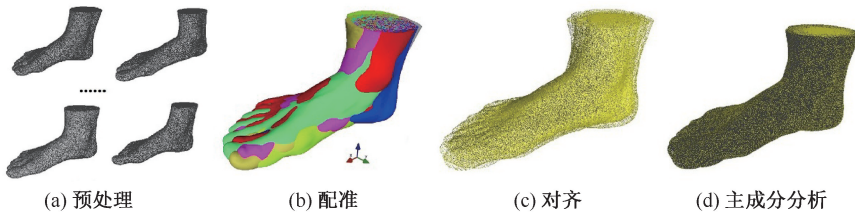


图2 三维足型形态数据处理示意图

Fig.2 Schematic for processing 3D foot shape data (a) Pre-processing, (b) Registration, (c) Alignment, (d) PCA

## 2 结果

通过对 50 组三维足型数据 PC 降维分析,本文统计并列前 20 个 PC 的贡献率,依次为 PC1:48.01%; PC2:11.38%; PC3:7.48%; PC4:5.03%; PC5:3.47%; PC6:3.15%; PC7:2.26%; PC8:2.03%; PC9:1.67%; PC10:1.31%; PC11:1.29%; PC12:1.09%; PC13:0.99%; PC14:0.97%; PC15:0.88%; PC16:0.74%; PC17:0.73%;

式中: $y$  为描述该训练集内任何三维统计形态模型的矩阵; $\bar{y}$  为 PC 分析降维训练出的平均三维统计形态矩阵; $a$  为描述前  $k-1$  个 PC 形态变化的特征向量矩阵; $b$  为描述具体形态参数的矩阵。通过 PCA 降维,依次计算出前 20 个 PC 及各对应的贡献率和累计贡献率,平均形状及各 PC 的正负标准差(standard deviation, SD)。通过 CloudCompare (<http://www.danielgm.net/cc/>) 软件中云点-网面距离(Could-Mesh Distance)计算工具,分别计算各 PC 与平均形状间的最大距离(豪斯多夫距离, Hausdorff distance)、均方根(root mean square, RMS)平均距离及对应 SD,并结合色标[+5 mm(红色)~-5 mm(蓝色)]标示三维统计形态模型的距离。

PC18:0.68%; PC19:0.59%; PC20:0.54%。且 PC1 与 PC2 间无线性关系(见图 3)。

PC 降维分析后,足型 SSM 的 PC1~PC6 累计贡献率约达到 80%,本文将该 6 个 PC 在平均三维统计形态足模型基础上的正、负 SD 在图 4、5 中作示意,且在表 1 中将具体空间位置差异进行量化描述。

如图 4 中距离位置所示,PC1 的 SSM 差异主要

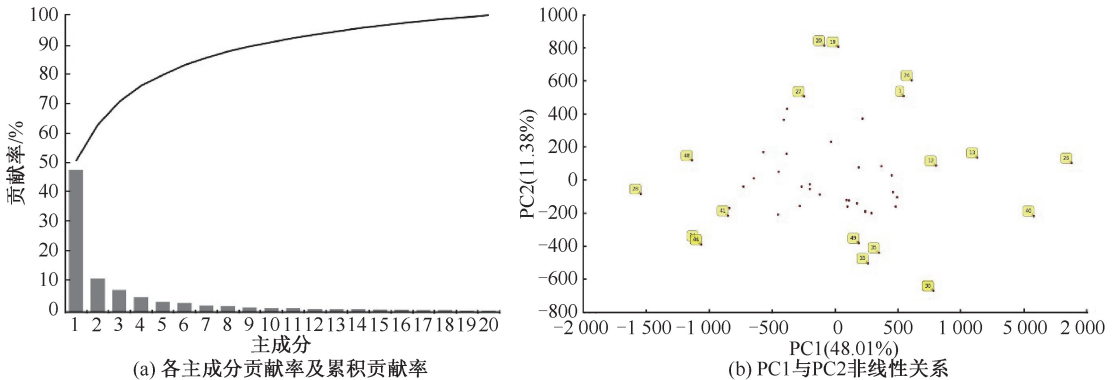


图3 主成分分析结果

Fig.3 Results of principal component analysis (a) Percentage and accumulative percentage of PCs, (b) Non-linear relation between PC1 and PC2

在足型的长短及宽窄,PC2 的 SSM 差异主要在小腿后端维度和足弓高度及足背厚度,PC3 的 SSM 差异主要在小腿前端维度和后足底外侧及大脚趾展收位置,PC4 的 SSM 差异主要在小腿内侧维度和足弓及前足外测宽度,PC5 的 SSM 差异主要在前足外侧宽度、小腿内侧维度及大脚趾展收位置,PC6 的 SSM 差异主要在第 2 脚趾长短、小腿外侧维度及前足背外侧高度。图 5 从内侧视角对各 PC 相对于平均足三维 SSM 的差异作统一示意。

通过对比彩色色标可发现,PC4、PC5 与 PC6 与平均形态的差异已较小,均在正负 2~3 mm 范围,详见表 1 中具体量化数据,各 SD 距离差异的色标单位与图 4 一致。

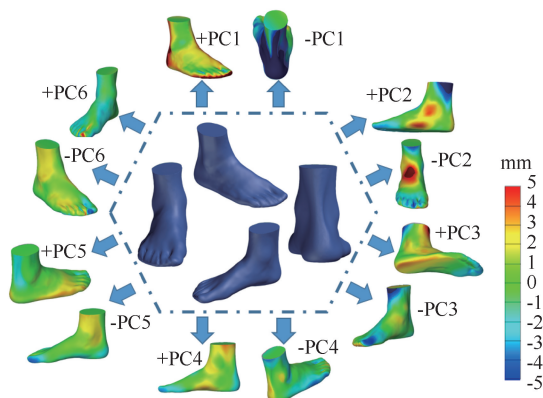


图 4 平均形态(中间)与前 6 个主成分正(上限)、负(下限)标准差统计形态示意图

Fig. 4 Schematic of mean SSM (central) and plus (max) / minus (min) SD SSM for PC1 to PC6

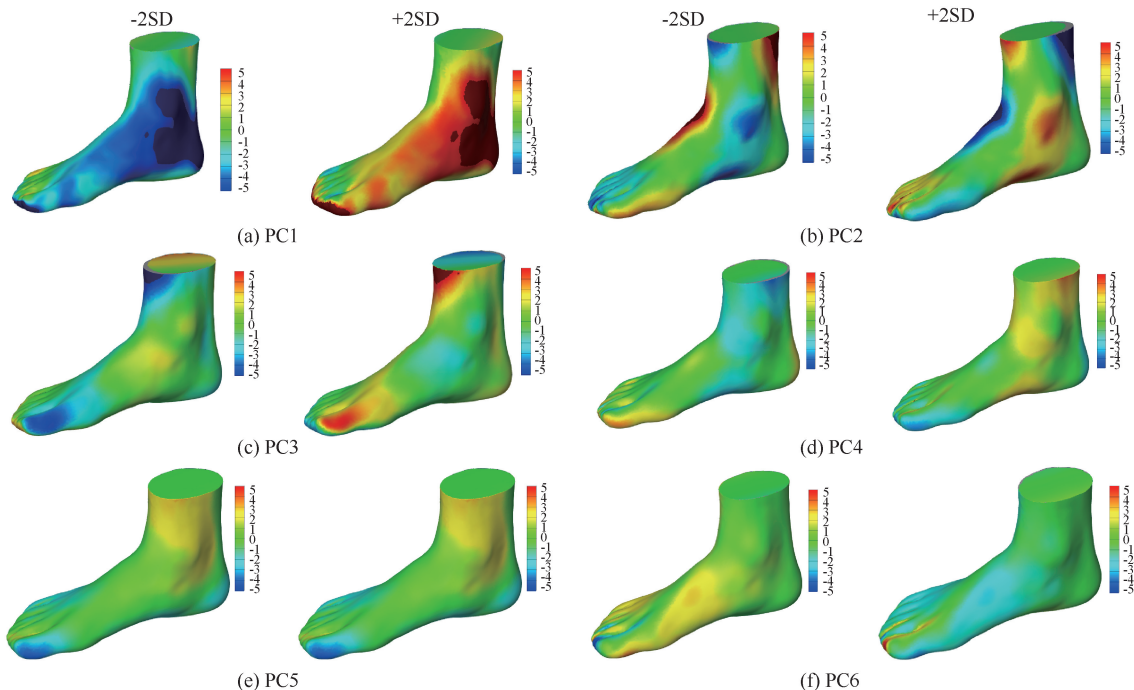


图 5 PC1~6 统计形状主成分内侧视角变化示意图

Fig. 5 Schematic of SSM variations from PC1 to PC6 in medial view (a) PC1, (b) PC2, (c) PC3, (d) PC4, (e) PC5, (f) PC6

### 3 讨论

本文采用三维统计形状建模方法,基于 50 个中国青年男性右足三维足型表面数据,构建了代表该类人群足型的三维 SSM,并揭示该人群中三维足型的变化和方差,为后续 SSM 方法及本研究结果在基于人群的鞋具定制、个性化纠正鞋垫及足部畸形快速诊断等方面提供参考。

足的三维形态受大量因素影响,除了肥胖、种族及人体测量学参数外<sup>[17-18]</sup>,前期研究已揭示了其他的相关因素,如有无鞋具(裸足或着鞋)习惯、特殊鞋具(如高跟鞋、芭蕾舞鞋及职业特殊鞋具)及长期特定运动习惯对足形态的适应性影响,并且会出现相应不同的生物力学表现<sup>[19-22]</sup>。然而,前期研究多头主足的二维形态,例如足长、足宽、足弓高度、大脚趾角度等数据差异。目前,CT、MRI 及光学等

表1 PC1~6 正负标准差统计形态模型与平均统计形态模型的量化差异

Tab.1 Quantitative difference of PC1-6 plus/minus SD SSM from mean SSM

主成分		最大距离/ mm	平均距离/ mm	标准差/ mm
PC1 (尺寸大小)	-2SD	12.03	2.61	2.16
	+2SD	13.58	3.05	2.51
PC2 (中足高度)	-2SD	8.64	0.49	2.15
	+2SD	7.43	0.34	2.10
PC3 (大脚趾展收)	-2SD	7.07	0.50	1.65
	+2SD	6.46	0.64	1.64
PC4 (前足宽)	-2SD	4.63	0.61	1.24
	+2SD	4.54	0.69	1.24
PC4 (前足宽)	-2SD	4.55	0.05	1.21
	+2SD	4.61	0.12	1.22
PC6 (第2脚趾长度)	-2SD	4.55	0.57	1.02
	+2SD	5.06	0.52	1.02

三维扫描技术也不断应用至足形态的评估。本文通过三维SSM分析,并做PCA降维,从三维角度揭示足形态的差异,并结合前6个PC展开分析讨论。

(1) PC1主要揭示了足长与宽及后跟隆起等足大小(尺寸)的差异,与前期的足二维测量数据相关研究结果相近<sup>[11,23]</sup>;此外,本文三维SSM的PC1在后跟大小也出现差异,可能与不同功能适应性相关<sup>[24-25]</sup>。

(2) PC2揭示了小腿后端维度和足弓高度及足背厚度的差异。鉴于本文中所有足模型均在足底面以上150mm处作横切面,小腿部的维度变化可能归因于小腿后侧肌肉发达程度<sup>[26]</sup>;而足部软组织相对较少,PC2中足弓与足背高度的差异说明在正常足形态中,足弓依然是一个主要变化的因素。通过该足三维SSM计算出的足弓高度正常范围可作为临床诊断扁平足的参照,即超过正常范围的一定量判定为扁平足,并针对三维足底面形态制定个性化“贴合”的矫正鞋垫。

(3) 在PC3中小腿前端外侧维度的差异可能与上述小腿后侧维度差异的原因类似,即小腿前侧软组织含量及肌肉(如胫骨前肌)发达程度有关;后足的足底外侧形态变化可能与该50个足形态数据中的足姿态相关,即在正常的足形态及姿态数据中,足依然会呈现出内翻或外翻的差异,且足姿态会呈现出动态变化。明确足姿态的变化范围也可作为跑步的控制鞋具提供参照,避免因过度内翻或外

翻出现的负荷累积而产生跑步相关损伤<sup>[27-28]</sup>。关于大脚趾的展收位置变化,说明该50个足形的人群可能有不同鞋具穿着习惯,如束紧或尖头鞋具会将脚趾束缚,影响其自然舒展及自由运动,长期束缚可能会产生拇外翻的脚趾畸形变化<sup>[29-30]</sup>。

(4) PC4中小腿内侧维度的变化同理也可归因于小腿肌肉发达程度及软组织含量的因素。除此之外的变化主要集中在足弓及前足,更进一步说明其他三维形态在PCA降维后足弓依然是一个形态差异,说明即使在其他参数不会出现太大变化的基础上,足弓三维形态因素依然需要重点考虑,为个性化定制足弓鞋垫提供参考借鉴价值<sup>[31]</sup>。

(5) 而前足的宽度在PC5中也被发现,说明正常足形态数据中依然会出现宽足和窄足形的情况,三维鞋楦的制作过程中需要考虑该因素,即在其他三维足的参数均相近的条件下,前足的宽窄依然是一个变量。造成PC5中小腿内侧维度差异的原因是小腿肌肉发达程度及软组织含量等因素。值得注意的是,三维足形态在PC降维后,大脚趾展收位置依然是一个变化因素,说明该50组正常足形数据尚不能直接用作参考数据库,以诊断大脚趾及第1跖趾关节形变,后期需不断扩充样本数据库。

(6) 在PC6中发现,小腿外侧维度及前足背外侧高度与小腿肌肉发达程度及软组织含量等因素相关,重点需注意在第2脚趾位置出现长短的变化,表明最长脚趾可能会在大脚趾或第2脚趾。

本文的局限性如下:①足形态数据仅为三维表面足形态,无足内部各环节骨骼的具体形态,后期将更进一步延展本研究并引入足部各骨骼的形态,研究足表面形态差异与内部各骨骼形态是否存在关联性,并结合足骨骼形态构建个体化的多环节足模型<sup>[32]</sup>;②使用50个右足数据,仅是一个导向研究,即探究该方法的可行性,并获得验证;后期将增大样本量,以提高统计形态模型的精准性。

本文探讨的足三维SSM应用启示如下:①获得的平均足三维形态以及参数性的变化,可运用至基于该人群的三维鞋楦制作及个性化鞋具定制;②足底形态变化参数可用于符合足底形态的功能性鞋垫定制。

#### 参考文献:

[1] HEIMANN T, MEINZER HP. Statistical shape models for 3D

- medical image segmentation: A review [J]. *Med Image Anal*, 2009, 13(4): 543-563.
- [ 2 ] SARKALKAN N, WEINANS H, ZADPOOR AA. Statistical shape and appearance models of bones [J]. *Bone*, 2014, 60(3): 129-140.
- [ 3 ] BESL PJ, MCKAY ND. Method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1992, 14(3): 586-606.
- [ 4 ] 李晓捷, 李光旭. 基于粒子滤波器算法的特征标记点匹配[J]. *计算机工程*, 2016, 42(2): 249-265.
- [ 5 ] KING AP, ECKERSLEY RJ. *Statistical shape models in statistics for biomedical engineers and scientists* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 217-228.
- [ 6 ] 杨稳, 刘晓宁, 朱菲, 等. 基于统计形状模型的颅骨自动性别识别[J]. *计算机科学*, 2019, 46(6): 282-287.
- [ 7 ] 税午阳, 吴秀杰. 奇和洞古人类头骨面貌的三维虚拟复原[J]. *科学通报*, 2018, 63(8): 745-754.
- [ 8 ] 陈智强, 王作伟, 方龙伟, 等. 基于机器学习和几何变换的实时 2D/3D 脊椎配准[J]. *自动化学报*, 2018, 44(7): 1183-1194.
- [ 9 ] LAVECCHIA CE, ESPINO DM, MOERMAN KM, *et al.* Lumbar model generator: A tool for the automated generation of a parametric scalable model of the lumbar spine [J]. *J R Soc Interface*, 2018, 15(138): 1-13.
- [10] 肖求根, 程明, 王博亮. 基于三维统计形状模型的肝脏分割[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2013, 52(6): 751-756.
- [11] SHU Y, MEI QC, FERNANDEZ J, *et al.* Foot morphological difference between habitually shod and unshod runners [J]. *PloS One*, 2015, 10(7): 1-13.
- [12] 梅齐昌, 顾耀东, 李建设. 基于足部形态特征的跑步生物力学分析[J]. *体育科学*, 2015, 35(6): 34-40.
- [13] ZHANG J, MALCOLM D, HISLOP-JAMBRICH J, *et al.* An anatomical region-based statistical shape model of the human femur [J]. *Comput Method Biomec*, 2014, 2(3): 176-185.
- [14] ZHANG J, HISLOP-JAMBRICH J, BESIÉ TF. Predictive statistical models of baseline variations in 3-D femoral cortex morphology [J]. *Med Eng Phys*, 2016, 38(5): 450-457.
- [15] ZHANG J, FERNANDEZ J, HISLOP-JAMBRICH J, *et al.* Lower limb estimation from sparse landmarks using an articulated shape model [J]. *J Biomech*, 2016, 49(16): 3875-3881.
- [16] GOWER J. Generalized procrustes analysis [J]. *Psychometrika*, 1975, 40(1): 33-51.
- [17] MAUCH M, GRAU S, KRAUSS I, *et al.* Foot morphology of normal, underweight and overweight children [J]. *Int J Obesity*, 2008, 32(7): 1068-1075.
- [18] DOMJANIC J, SEIDLER H, MITTEROECKER P. A combined morphometric analysis of foot form and its association with sex, stature, and body mass [J]. *Am J Phys Anthropol*, 2015, 157(4): 582-591.
- [19] MEI QC, GU YD, SUN D, *et al.* How foot morphology changes influence shoe comfort and plantar pressure before and after long distance running? [J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2018, 20(2): 179-186.
- [20] XIANG LL, MEI QC, FERNANDEZ J, *et al.* Minimalist shoes running intervention can alter the plantar loading distribution and deformation of hallux valgus: A pilot study [J]. *Gait Posture*, 2018, 65(9): 65-71.
- [21] MEI QC, GU YD, XIANG L, *et al.* Foot shape and plantar pressure relationships in shod and barefoot populations [J]. *Biomech Model Mechan*, 2019, 11(9): 1-14.
- [22] MEI QC, FERNANDEZJ, FU W, *et al.* A comparative biomechanical analysis of habitually unshod and shod runners based on a foot morphological difference [J]. *Hum Movement Sci*, 2015, 42(8): 38-53.
- [23] D'AOÛT K, PATAKY TC, CLERCQ D, *et al.* The effects of habitual footwear use: Foot shape and function in native barefoot walkers [J]. *Footwear Sci*, 2009, 1(2): 81-94.
- [24] MOORE ES, KINDIG MW, MCKEARNEY DA, *et al.* Hind- and midfoot bone morphology varies with foot type and sex [J]. *J Orthop Res*, 2019, 37(3): 744-759.
- [25] GU YD, MEI QC, FERNANDEZ J, *et al.* Foot loading characteristics of Chinese bound feet women: A comparative analysis [J]. *PloS One*, 2015, 10(4): 1-9.
- [26] FERNANDEZ J, MITHRATNE K, ALIPOUR M, *et al.* Towards rapid prediction of personalised muscle mechanics: Integration with diffusion tensor imaging [J]. *Comput Method Biomec*, 2018, 9(9): 1-9.
- [27] ANGIN S, MICKLE KJ, NESTER CJ. Contributions of foot muscles and plantar fascia morphology to foot posture [J]. *Gait Posture*, 2018, 61(3): 238-242.
- [28] 梅齐昌, 相亮亮, 孙冬, 等. 长距离跑后“足外翻”姿态增加膝关节内侧接触力: 基于 OpenSim 肌骨建模及机器学习预测的研究 [J]. *体育科学*, 2019, 39(9): 51-59.
- [29] NIX SE, VICENZINO BT, COLLINS NJ, *et al.* Characteristics of foot structure and footwear associated with hallux valgus: A systematic review [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2012, 20(10): 1059-1074.
- [30] MEI QC, FERNANDEZ J, HUME P, *et al.* Investigating biomechanical function of toes through external manipulation integrating analysis [J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2016, 18(1): 97-102.
- [31] 苏宏伦, 郭俊超, 莫中军, 等. 个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究 [J]. *医用生物力学*, 2016, 31(6): 490-494.
- [32] SUN HL, GUO JC, MO ZJ, *et al.* Biomechanical study on the personalized orthopaedic insoles for flatfoot [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(6): 490-494.
- [32] 梅齐昌, 顾耀东, 孙冬, 等. 基于影像学构建个体化 OpenSim 下肢肌骨模型的生物力学研究应用进展 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(2): 259-264.
- MEI QC, GU YD, SUN D, *et al.* Progress on biomechanical research of image-based subject-specific OpenSim lower extremity musculoskeletal model [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(2): 259-264.