

文章编号: 1004-7220(2024)02-0243-07

膝关节统计学形状模型的几何外形有效性验证

段化兵, 谷雪莲, 李晓虎, 周金成, 常逸昊, 王杰, 郭笑辰

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要:目的 获取中国男性健康膝关节的解剖参数范围,并验证健康膝关节统计学形状模型(statistical shape model, SSM)在几何外形上的有效性,为基于膝关节SSM的假体设计提供依据。方法 采集112例健康男性膝关节CT影像,建立三维膝关节模型,每例模型都单独作为目标模型,剩余模型作为训练集进行主成分分析(principal component analysis, PCA),将得到的SSM向着目标模型进行拟合预测,得到SSM拟合模型。在样本模型和SSM拟合模型上分别标记出相同的解剖测量点,并得出17个线性参数和3个角度参数。对解剖参数值采用独立样本 t 检验和Mann-Whitney U检验进行统计学检验,若得出的 P 值均大于0.05,则证明SSM在几何外形上的有效性。结果 解剖参数的定性和定量对比分析的结果显示,线性参数值的平均偏差均小于6 mm,角度参数值均小于 2.5° ;统计学检验的结果显示所有解剖参数的 $P>0.05$,证明膝关节SSM拟合模型与真实健康模型在几何外形上不具有统计学差异。结论 获得了健康膝关节解剖参数的参考范围,并验证了膝关节SSM模型在外形上与真实健康模型具有一致性。研究结果为基于膝关节SSM的假体设计提供依据。

关键词: 膝关节; 统计学形状模型; 主成分分析; 几何外形; 解剖参数

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.008

Geometric Shape Validation of Knee Statistical Shape Model

DUAN Huabing, GU Xuelian, LI Xiaohu, ZHOU Jincheng, CHANG Yihao, WANG Jie, GUO Xiaochen

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: **Objective** To obtain the range of anatomical parameters of healthy knee joints in Chinese males and validate a statistical shape model (SSM) based on the geometric shape of a healthy knee to provide references for the design of knee SSM-based prostheses. **Methods** Computed tomography (CT) images of knee joints from 112 healthy males were acquired to build three-dimensional (3D) knee joint models. Each model was the target model separately, and the remaining models were used as the training set for principal component analysis (PCA). The obtained knee SSM was fitted to the target model to predict the SSM. The exact anatomical measurement points were marked on the sample and SSM prediction models, and 17 linear and 3 angular parameters were derived. The values of the anatomical parameters were statistically tested using an independent samples t -test and Mann-Whitney U-test, and the validity of the SSM in terms of geometric shape was demonstrated if the resulting P -values were all greater than 0.05. **Results** Qualitative and quantitative comparative analyses of anatomical parameters showed that the mean deviation of linear parameters was less

收稿日期: 2023-07-01; 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 上海理工大学医工交叉项目(10-22-308-530)

通信作者: 谷雪莲, 副教授, E-mail: guxuelian@usst.edu.cn

than 6 mm, and that of angular parameters was less than 2.5° . The results of statistical tests showed $P > 0.05$ for all anatomical parameters, proving that the knee SSM prediction model was not statistically different from the true healthy model in terms of geometric shape. **Conclusions** This study derived a reference range of anatomical parameters for a healthy knee and demonstrated that the knee SSM model was consistent with the real healthy model in terms of shape. The results provide a reference for the design of knee SSM-based prostheses.

Key words: knee; statistical shape model (SSM); principal component analysis (PCA); geometric shape; anatomical parameters

全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)是目前治疗膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)的主要方法之一,其治疗效果受到假体尺寸和膝关节解剖尺寸匹配度的影响^[1]。在三维膝关节模型中测量解剖参数,提高了参数的真实性、准确性,并由此提高假体与膝关节的匹配程度,使设计的假体更加适合患者的膝关节^[2]。然而,由于患者之间存在个体差异,对患者个体的三维测量很难代表给定人群整体的参数标准。

统计学形状模型(statistical shape model, SSM)的引入为膝关节解剖参数测量和假体设计带来了新方法^[3]。其原理是通过 1 组样本来估计总体统计数据,无需确定每个样本的具体值^[4]。膝关节 SSM 是通过对齐 1 组膝关节三维模型,计算平均几何形状,并对单个模型和平均几何形状之间的偏差进行主成分分析(principal component analysis, PCA)来构建^[3,5]。膝关节 SSM 可以代表给定人群整体的解剖结构,并可以用于特定患者关节模型的重建,其可行性和可靠性已被验证^[6-7]。

Li 等^[7]提出利用某一特定人群三维膝关节 SSM 描述膝关节间隙(joint space width, JSW)解剖变异的方法,将 SSM 应用于人体膝关节解剖结构的定量评估中。该方法主要使用变形网格配准(deformable mesh registration, DMR)和 PCA 来关联给定对象的特征,可用于特定人群膝骨关节炎的诊断和膝关节间隙疾病患者膝关节假体的个性化设计。该研究已对膝关节 SSM 的定量评估标准进行数值验证,但还缺乏对几何外形上的有效性验证。

本文旨在获取中国男性健康膝关节解剖参数范围,验证基于健康膝关节的 SSM 在几何外形上的有效性,为基于膝关节 SSM 假体设计提供依据。

1 材料和方法

1.1 图像数据采集

招募 112 名非膝关节疾病男性测试者,年龄 18~67 岁,平均 (41.3 ± 12.1) 岁。使用 Siemens Sensation 64 CT 扫描设备(Siemens 公司,德国)对受试者膝关节进行 CT 扫描,扫描参数如下:峰值电压 120 kV;切片宽度 1 mm;像素 512×512 ;空间分辨率 $0.488 \text{ mm} \times 0.488 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$;位元深度 12 位数/像素;储存格式 DICOM。本研究通过了江苏大学昆山医院的伦理审查。

1.2 膝关节三维模型建立与纳入标准

利用 Mimics 21.0(Materialise 公司,瑞士)阈值分割功能初步分割出膝关节蒙版,对蒙版进行手动精细修复,并利用三维重建功能生成三维模型,最后利用 Wrap 功能对模型做光滑处理。在 3-matic 15.0(Materialise 公司,瑞士)中对模型划分 3 mm 网格。为保证膝关节模型的统一性,将左膝关节模型镜像为右膝关节^[8]。三维模型的纳入标准保证了膝关节 SSM 捕获的解剖变异来自健康膝关节。纳入标准的定义如下:

(1) 股骨。滑车沟角(sulcus angle, $\angle SA$)^[9],即内外髁最高点与股骨沟最低点连线之间的角度, $\angle SA$ 的纳入标准为 $140.61^\circ \pm 4.85^\circ$ ($129.61^\circ \sim 149.75^\circ$),文献[9]中标准为 $139.44^\circ \pm 4.95^\circ$ ($129.50^\circ \sim 151.69^\circ$)。

(2) 髌骨。髌骨关节面宽高比(R_1)^[10],即髌骨关节面宽度(articular surface width, ASW)与高度(articular surface height, ASH)的比值, $R_1 = ASW/ASH$ (ASW 为关节面内外侧点的最远距离,ASH 为关节面上下缘最凸点的距离)。 R_1 的纳入标准为 1.60 ± 0.13 ($1.32 \sim 2.00$),文献[10]中标准为 1.69 ± 0.20 ($1.28 \sim 2.19$)。

(3) 胫骨。胫骨截骨面横纵比(R_2)^[11],即胫骨横径(tibial mediolateral, tML)为平行于股骨横径(femoral mediolateral, fML)在胫骨截骨面上投影线的最长的线段;纵径为内侧前后径(tibial medial anteroposterior, tMAP)和外侧前后径(tibial lateral anteroposterior, tLAP)的平均值,tMAP和tLAP为穿过胫骨髁最后侧点并垂直于tML的直线。 $R_2 = 2 \text{ tML} / (\text{tMAP} + \text{tLAP})$, R_2 纳入标准为 $1.52 \pm 0.05 (1.37 \sim 1.65)$, 文献[11]中标准为 $1.60 \pm 0.05 (1.48 \sim 1.71)$ 。

1.3 膝关节 SSM 建立及几何外形验证

1.3.1 膝关节 SSM 建立 通过对训练集模型样本模板和 DMR 网格进行 PCA 创建膝关节 SSM^[7]。SSM 在正态分布的区间内连续变化,其定义为:

$$X = \bar{X} + \sum_{i=1}^m \omega_i \nu_i \quad (1)$$

式中: \bar{X} 为所有膝关节模型样本的平均模型; m 为解释训练集中 90% 的总变化所需的主成分 ν_i 的数量; ω_i 是从高斯采样分布中生成的权重变形系数,在 $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$ 范围内变化。在 $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$ 范围内对 ω_i 随机重抽样 20 次。

每例样本模型都单独作为目标模型,剩余模型作为训练集创建膝关节 SSM,对得到的主成分赋予不同权重,使 SSM 向着目标模型预测拟合,以得到 SSM 拟合模型。

1.3.2 统计学分析及膝关节 SSM 几何外形验证

测量标志点与解剖参数如图 1 所示。所有解剖参数均由 3 名测量者独立测量并取平均值。对选取的测量点坐标做偏差分析,并对解剖参数值做组内相关系数检验(r)。

所测数据以(平均值 \pm 标准差)的方式表示,检验水准均取 $\alpha=0.05$, $P>0.05$ 表示差异不具有统计学意义。Kolmogorov-Smirnov 检验用于对数据的正态性检验,Levene 检验用于方差齐性检验,独立样本双尾 t 检验用于对样本模型和 SSM 拟合模型解剖参数值的统计学差异分析。对膝关节 SSM 的几何外形验证过程如下:分别测得样本模型和预测模型的三维参数,对满足方差齐性和正态性的参数值做独立样本 t 检验得到 P 值,对不满足方差齐性或正态性的参数值做 Mann-Whitney U 检验。若独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验中 $P>0.05$,则表

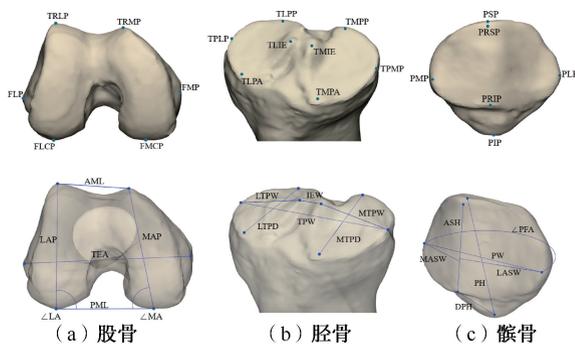


图 1 测量标志点和解剖参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement marker points and anatomical parameters

(a) Femur, (b) Tibia, (c) Patella

注:TRLP、TRMP、FLCP、FMCP、FLP、FMP 分别为外侧滑车脊最前侧点、内侧滑车脊最前侧点、股骨外侧髁最后侧点、股骨内侧髁最后侧点、股骨外侧髁最凸点、股骨内侧髁最凹点;TLPP、TMPP、TLPA、TMPA、TPLP、TPMP、TLIE、TMIE 分别为胫骨外侧平台最后侧点、胫骨内侧平台最后侧点、胫骨外侧平台最前侧点、胫骨内侧平台最前侧点、胫骨平台最外侧凸点、胫骨平台最内侧凸点、胫骨外侧髁间隆起最高点、胫骨内侧髁间隆起最高点;PSP、PIP、PLP、PMP、PRSP、PRIP 分别为髌骨近端最凸点、髌骨远端最凸点、髌骨外侧最凸点、髌骨内侧最凸点、髌骨中央脊近端最凸点、髌骨中央脊远端最凸点。下同。

示模型与预测模型差异无统计学意义,可以证明预测模型几何外形的有效性。以上检验结果在 SPSS 26(IBM 公司,美国)统计软件中计算获得。

2 结果

对训练集模型进行 PCA 建立膝关节 SSM,并得到一系列主成分 ν_i ,分别代表膝关节样本中不同的解剖变异。前 3 个主成分占据总方差的近 60%,即描述着大部分的解剖变异^[7]。在 $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$ 内调整主成分 ν_i 时,训练集模型的解剖变异将在 SSM 上表现出来。图 2(a)展示了主成分 1~3 在 $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$ 变化时 SSM 所捕获的膝关节解剖变异。主成分 1 主要捕获到膝关节样本整体缩放的变化趋势,代表了不同患者膝关节的整体大小差异;主成分 2 捕获的差异主要体现在股骨横径和胫骨横径与颈干直径的反比变化关系,髌骨则是宽高的反比变化关系,代表了患者膝关节内外旋和内外翻的体态差异;主成分 3 捕获的差异主要为膝关节内外侧的体积在前后方向上的差异,代表了膝关节的屈伸角度

变化。通过调整单一主成分的权重 ω_i , 可以观察 SSM 变化趋势, 与患者的趋势对比可以预估诊断患者在体态上是否具有病症。对不同主成分赋予不同的权重 ω_i , 则可以将 SSM 向着不同的目标模型拟合^[7]。当拟合模型与患者模型在某一方向上形状差异较大时, 考虑患者是否具有骨缺损相关症状。图 2(b) 为 SSM 拟合预测健康样本模型的效果。

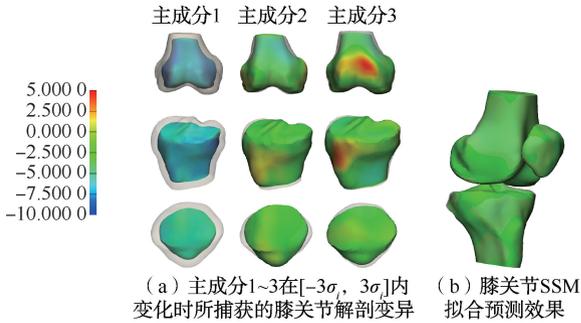


图 2 解剖变异及 SSM 拟合效果

Fig. 2 Anatomical variations and SSM fit effect (a) Knee anatomical variation captured when principal component 1 to principal component 3 varied within $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$, (b) Knee SSM fit prediction effect

中国健康男性膝关节模型和 SSM 拟合模型的

解剖参数平均测量结果见表 1。对健康膝关节模型与 SSM 模型的所有解剖参数值进行定量偏差分析。结果表明, 所有线性参数值的整体偏差范围为 0.05~0.46 mm(最小为 IEW, 最大为 LAP), 角度参数的误差范围为 $1.42^\circ \sim 2.11^\circ$ (见图 3)。

Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验的结果显示所有参数值均满足正态性(所有 $P > 0.05$), 但是胫骨的 MTPD 参数不具有方差齐性 ($F = 1.5, P < 0.05$)。因此, 对 MTPD 以外的参数进行独立样本 t 检验, 对 MTPD 进行 Mann-Whitney U 检验。两组解剖参数测量值在两种模型上的定性对比分析显示, 解剖参数值在两种模型上的正态分布趋势基本一致。统计学检验结果显示, 所有参数值统计学检验的 $P > 0.05$, 证明膝关节 SSM 拟合模型与健康样本模型不具有统计学差异, 即证明膝关节 SSM 拟合模型在几何外形上的有效性(见图 4, 5)。

3 讨论

根据 SSM 的特点^[4], 基于 SSM 为给定人群设计通用假体可以改善因患者个体差异带来的费时费力问题, SSM 是否可以有效代表该人群整体尺寸

表 1 膝关节解剖参数平均测量结果

Tab. 1 Mean measurements of anatomical parameters of the knee joint

股骨			胫骨			髌骨		
参数	健康模型	SSM 模型	参数	健康模型	SSM 模型	参数	健康模型	SSM 模型
LAP/mm	62.73±2.59 (56.13~69.04)	62.62±2.43 (55.64~67.85)	TPW/mm	72.89±2.48 (67.09~79.01)	72.80±2.44 (66.54~78.94)	PH/mm	40.44±1.80 (36.48~45.53)	40.36±1.75 (36.81~44.91)
MAP/mm	62.32±3.10 (54.22~70.69)	62.15±2.96 (53.83~69.86)	IEW/mm	12.16±1.23 (9.09~15.31)	12.09±1.18 (9.07~15.37)	PW/mm	44.48±2.29 (37.87~51.00)	44.35±2.22 (38.21~50.71)
TEA/mm	81.76±3.28 (73.96~92.12)	81.69±3.12 (74.01~91.17)	LTPD/mm	37.81±1.85 (32.48~42.27)	37.66±1.87 (32.48~42.22)	ASH/mm	28.86±1.27 (26.3~31.88)	28.81±1.26 (26.30~31.83)
AML/mm	34.06±1.42 (29.12~38.35)	34.21±1.46 (29.34~38.46)	MTPD/mm	47.78±1.96 (42.24~52.26)	47.67±1.89 (42.29~51.95)	DPH/mm	16.06±1.43 (12.22~19.36)	15.96±1.45 (12.57~19.01)
PML/mm	47.89±2.36 (42.74~53.58)	47.78±2.42 (42.77~53.46)	LTPW/mm	31.03±0.99 (28.27~33.09)	30.99±0.95 (28.43~33.04)	∠PFA/(°)	138.31±4.20 (129.31~147.68)	138.68±4.08 (129.56~147.11)
∠MA/(°)	75.77±1.65 (71.79~79.83)	75.80±1.57 (71.91~78.81)	MTPW/mm	32.19±1.21 (29.53~34.67)	32.15±1.23 (29.18~34.71)	MASW/mm	20.99±1.65 (17.24~24.94)	20.90±1.61 (17.03~24.91)
∠LA/(°)	91.22±1.54 (87.31~94.49)	91.13±1.42 (88.24~94.65)				LASW/mm	26.51±1.23 (23.30~29.74)	26.54±1.28 (23.29~29.86)

注: LAP、MAP、TEA、AML、PML、∠MA、∠LA 分别为外侧前后径、内侧前后径、经髌轴、前侧内外横径、后侧内外横径、股骨内髌角度、股骨外髌角度; TPW、IEW、LTPD、MTPD、LTPW、MTPW 分别为胫骨平台宽度、髌间隆起宽度、外侧胫骨平台深度、内侧胫骨平台深度、外侧胫骨平台宽度、内侧胫骨平台宽度; PH、PW、ASH、DPH、∠PFA、MASW、LASW 分别为髌骨高度、髌骨宽度、关节面高度、远端极点高度、髌骨面角度、内侧关节面宽度、外侧关节面宽度。下同。

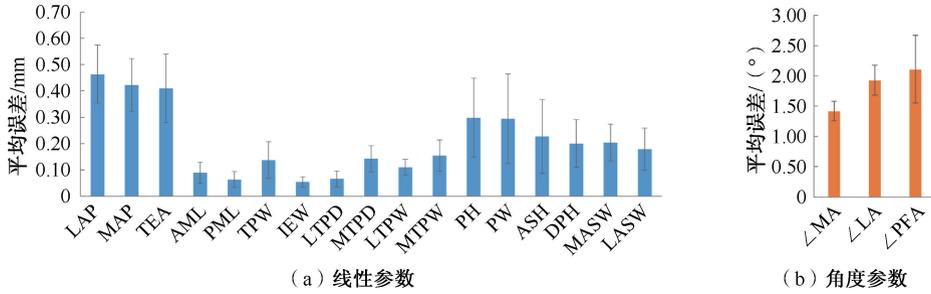


图3 不同参数值在健康样本模型与SSM拟合模型上平均误差

Fig. 3 Average error of parameters on the healthy sample model and SSM prediction model

(a) Linear parameters, (b) Angular parameters

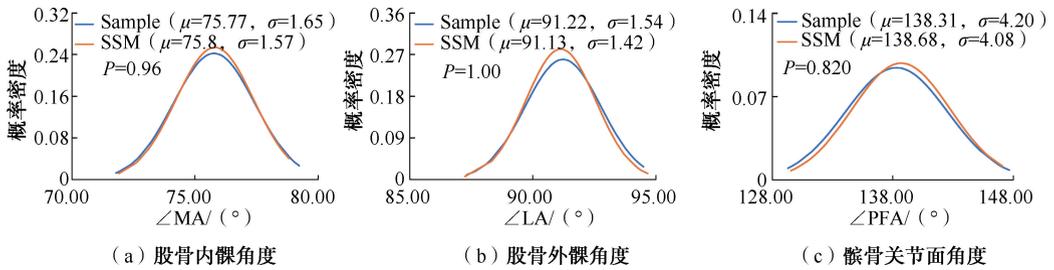


图4 角度参数在健康样本模型和SSM上的定性对比与统计学检验结果

Fig. 4 Qualitative comparison and statistical test results of angular parameters on the healthy sample model and SSM (a) Medialcondyle angle, (b) Lateralcondyle angle, (c) Patella facet angle

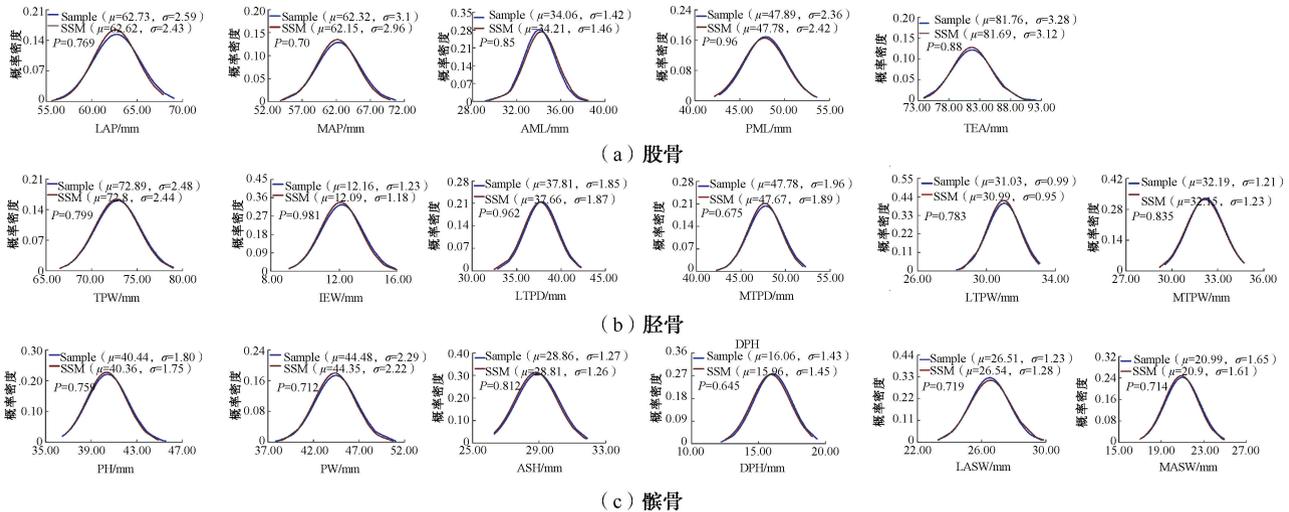


图5 线性参数在健康样本模型和SSM上的定性对比与统计学检验结果

Fig. 5 Qualitative comparison and statistical test results of linear parameters on the healthy sample model and SSM

(a) Femur, (b) Tibia, (c) Patella

需要理论验证。本文收集112例中国男性健康膝关节CT数据用于建立膝关节SSM,并进行几何外形验证研究。本文验证方法采用17个线性参数和3个角度参数进行定性和定量对比分析以及统计学检验,多

元化地验证了膝关节SSM几何外形的有效性。

影响验证研究结果的重要因素之一是选取测量点时的坐标精度。测量点坐标的精度可靠性分析如图6所示。样本模型上测量点与平均测量点

之间的平均偏差 d_1 范围为 1.19~1.93 mm, SSM 拟合模型上测量点与平均测量点之间的平均偏差 d_2 范围为 1.17~1.83 mm。在样本模型和 SSM 拟合模型上选取同一测量点时的平均偏差 d_3 (0.24~0.45 mm) 和 d_4 (0.22~0.52 mm) 均小于 0.6 mm^[12], 从定量分析上表明测量点选取精度较高。所有相关系数 $r>0.8, P<0.05$ 。

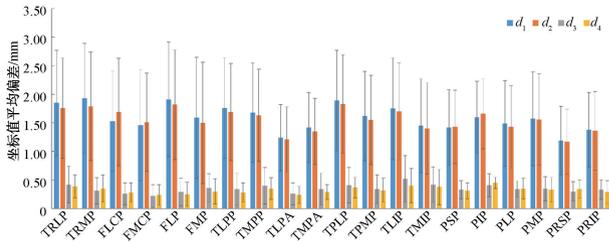


图6 测量标志点坐标值平均偏差

Fig. 6 Average deviation of coordinate values of measured marker points

注: d_1, d_2, d_3, d_4 分别表示样本模型上测量点与平均测量点之间的平均偏差、SSM 拟合模型上测量点与平均测量点之间的平均偏差、样本模型测量点的测量者间平均偏差、SSM 拟合模型测量点的测量者间平均偏差。

滑车沟角 ($\angle SA$)、髌骨关节面角度 ($\angle PFA$) 和股骨内外髁角度 ($\angle MA, \angle LA$) 通常与髌股关节的稳定性相关。当患者的角度值与参考范围偏差较大时, 可以初步评估诊断患者可能出现髌骨面角度异常的情况, 并导致髌股关节紊乱和髌骨脱位风险的增加。本研究中样本模型的 $\angle SA$ 和 $\angle PFA$ 分别为 $140.61^\circ \pm 4.85^\circ$ 和 $138.31^\circ \pm 4.2^\circ$, Fürmetz 等^[13] 报道的西方人群的对应该参数值为 $148.1^\circ \pm 6.5^\circ$ 和 $126.2^\circ \pm 6.4^\circ$, 中国人群与西方人群相比具有更高的平行程度和契合程度。此外, 本研究中 $\angle MA$ 和 $\angle LA$ 分别为 $75.77^\circ \pm 1.65^\circ$ 和 $91.22^\circ \pm 1.54^\circ$, 表示中国人群内外髁对称性更高。

样本模型和 SSM 拟合模型的几何外形一致程度用同一参数的偏差值评定。图 4、5 中显示所有解剖参数值在两种模型上的正态分布趋势均接近一致, 图 3 显示线性参数的平均偏差值均控制在 0.5 mm 以内, 小于临床上 0.6 mm^[12] 的要求, 角度参数也均小于 2.5° , 证明 SSM 拟合模型可以在几何形态上近似为样本模型, 为基于 SSM 拟合模型针对单个患者的个性化假体设计提供了理论依据。Degen 等^[14] 利用类似的正态分布图说明了外侧股

骨远端力学角度在性别间的差异。对解剖参数值的统计学检验结果精确地证明了膝关节 SSM 与样本模型在几何外形上不具有统计学差异, 此结论可以为临床上基于 SSM 的假体设计提供理论依据。

本文结果表明, 中国男性的 MAP 平均值为 (62.32 ± 3.10) mm, 与 Yue 等^[15] (62.2 ± 3.9) mm 的 MAP 结果相近, LAP 则有一定差别。Yue 等^[15] 测得 LAP 为 (65.0 ± 2.80) mm, 本文为 (62.73 ± 2.59) mm。Berger 等^[16] 测得西方男性人群的股骨内侧宽度(类似本研究的 TEA) 和外侧前后径(类似本研究的 LAP) 为 (85.60 ± 5.10) mm 和 (68.10 ± 4.60) mm, 略大于本文的结果 [(81.76 ± 3.28) mm 和 (62.73 ± 2.59) mm]; 髌骨和胫骨的测量结果与 Mahfouz 等^[17] 和 Moghtadaei 等^[18] 的研究结果相比, 也可以得到类似的结论。Mahfouz 等^[17] 提出胫骨平台横径(类似本研究的 TPW) 的长度为 (79.2 ± 4.6) mm, 而本文为 (72.89 ± 2.48) mm。本文对中国男性健康膝关节线性解剖参数的测量结果与其他研究^[10-11, 19] 有所不同, 为设计出更加适合中国人群的膝关节假体补充理论依据。

本研究的局限性在于研究人群较为单一。本文验证了中国男性健康膝关节 SSM 几何外形的有效性, 但是缺乏对更多人群的分析。有研究表明, 即使是来自同一地区的不同性别的人群之间, 也会有骨骼形态上的差异, 通常表现为某些关键解剖尺寸上男性要比女性更大^[12]。后续的研究重点将会是分析来自不同地区以及不同性别的人群所建立的 SSM 是否遵循与本研究相同的规律, 这也有助于将基于 SSM 的假体设计扩展到更广的人群。

4 结论

本文获取中国男性健康膝关节的解剖参数范围, 并利用对参数值的定性定量分析和统计学检验, 验证了膝关节统计学模型在几何外形上的正确性; 从线性和角度不同参数类型证明了 SSM 与健康膝关节模型不具有统计学差异, 多元化地验证了 SSM 用于假体设计的可行性。本研究结果还可以为临床提供中国健康男性人群的解剖参数范围, 有助于对骨缺损相关疾病的诊断和治疗。后续将通过分析验证不同地区和性别的 SSM 来弥补本研究人群单一的不足。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:段化兵负责 SSM 几何外形验证研究设计、数据分析处理和论文撰写;谷雪莲负责研究思路检查和论文写作指导;李晓虎负责模型数据整理;周金成、常逸昊、王杰、郭笑辰负责论文修改。

参考文献:

- [1] LIU HT, XU BQ, FENG EY, *et al.* An imaging measurement study of normal knee parameters in southeast China [J]. *Curr Med Imaging*, 2021, 18(1): 32-37.
- [2] HIRSCHMANN MT, KONALA P, AMSLER F, *et al.* The position and orientation of total knee replacement components: A comparison of conventional radiographs, transverse 2D-CT slices and 3D-CT reconstruction [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2011, 93(5): 629-633.
- [3] 宫赫, 张萌, 邹姗姗. 肌骨系统生物力学建模 2021 年研究进展[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(1): 18-26.
- GONG H, ZHANG M, ZOU SS. Research advances in musculoskeletal biomechanical modeling in 2021 [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 18-26.
- [4] DAVIES R, TWINING CJ, TAYLOR CJ. Statistical models of shape: Optimisation and evaluation [M]. London: Springer, 2008, 1-2.
- [5] COOTES TF, TAYLOR CJ. Statistical models of appearance for computer vision [C]//Proceedings of Medical Imaging 2001. San Diego: [s. n.], 2001.
- [6] DUPRAZ I, BOLLINGER A, DECKX J, *et al.* Using statistical shape models to optimize TKA implant design [J]. *Appl Sci*, 2022, 12(3): 1020.
- [7] LI XH, GU XL, JIANG ZA, *et al.* Statistical modeling: Assessing the anatomic variability of knee joint space width [J]. *J Biomech*, 2023(147): 111420.
- [8] LYNCH JT, SCHNEIDER MTY, PERRIMAN DM, *et al.* Statistical shape modelling reveals large and distinct subchondral bony differences in osteoarthritic knees [J]. *J Biomech*, 2019(93): 177-184.
- [9] LI Z, LIU GZ, TIAN R, *et al.* The patellofemoral morphology and the normal predicted value of tibial tuberosity-trochlear groove distance in the Chinese population [J]. *BMC Musculoskel Dis*, 2021, 22(1): 575.
- [10] SHANG P, ZHANG LN, HOU ZT, *et al.* Morphometric measurement of the patella on 3D model reconstructed from CT scan images for the southern Chinese population [J]. *Chin Med J*, 2014, 127(1): 96-101.
- [11] ZHANG KS, HAN Q, WANG HC, *et al.* Measurement of proximal tibial morphology in northeast Chinese population based on three-dimensional reconstruction computer tomography [J]. *Medicine*, 2019, 98(45): e17508.
- [12] AUDENAERT EA, PATTYN C, STEENACKERS G, *et al.* Statistical shape modeling of skeletal anatomy for sex discrimination: Their training size, sexual dimorphism, and asymmetry [J]. *Front Bioeng Biotech*, 2019(7): 302.
- [13] FÜRMETZ J, DANIEL T, SASS J, *et al.* Three-dimensional assessment of patellofemoral anatomy: Reliability and reference ranges [J]. *Knee*, 2021(29): 271-279.
- [14] DEGEN N, SASS J, JALALI J, *et al.* Three-dimensional assessment of lower limb alignment: Reference values and sex-related differences [J]. *Knee*, 2020, 27(2): 428-435.
- [15] YUE B, VARADARAJAN KM, AI S, *et al.* Gender differences in the knees of Chinese population [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2011, 19(1): 80-88.
- [16] BERGER RA, RUBASH HE, SEEL MJ, *et al.* Determining the rotational alignment of the femoral component in total knee arthroplasty using the epicondylar axis [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1993(286): 40-47.
- [17] MAHFOUZ M, ABDEL FATAH EE, BOWERS LS, *et al.* Three-dimensional morphology of the knee reveals ethnic differences [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2012, 470(1): 172-185.
- [18] MOGHADAEI M, MOGHIMI J, FARAHINI H, *et al.* Morphology of proximal tibia in Iranian population and its correlation with available prostheses [J]. *Med J Islam Repub Iran*, 2015(29): 225.
- [19] CHEN Z, WANG YG, LI XH, *et al.* An automatic measurement system of distal femur morphological parameters using 3D slicer software [J]. *Bone*, 2022(156): 116300.