

膝关节骨性关节炎轻症患者膝关节三维有限元建模及力学分析

周陶勇¹, 杨永盛¹, 鲁宁², 唐浩², 杨延东², 韩谢川¹

1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明医科大学第二附属医院骨科, 云南 昆明 650500

【摘要】目的:在缺少层厚较薄的CT和MRI数据的情况下建立膝关节骨性关节炎(KOA)轻症患者膝关节三维有限元模型,并研究胫骨平台内外侧的应力分布。**方法:**以一名患有轻度KOA的女性患者为研究对象,自盆骨至腓骨胫骨远端进行连续断层扫描。将得到的DICOM格式文件导入至Mimics软件中并通过阈值分割提取膝关节中的骨性结构,将提取出的骨骼进行蒙版编辑、空腔填充、区域增长等操作后导入3-matic中做光顺、包覆处理。在Geomagic Wrap将处理后的骨性结构使用网格医生检查,修复表面缺陷并拟合曲面。以轮廓延展的思路建立相关的软骨、半月板和韧带,并在SolidWorks中以原点重合的方式与骨性结构进行装配。接下来在ANSYS软件中定义材料、设置接触、划分网格、设置约束和载荷,分析在双腿站立下胫骨平台上的应力分布情况。**结果:**成功建立了包括骨性结构、软骨、韧带的完整膝关节模型。在双腿站立状态下,接触应力峰值约为1.21 MPa,位于胫骨平台内侧中部,胫骨平台外侧的最大应力为0.72 MPa,内外侧间室分别承担总载荷的62.7%和37.3%。**结论:**通过CT提取加软件绘制的方式建立了全膝关节模型,有限元分析结果符合临床预期,通过此方法建立的模型可靠,能进行后续的研究。

【关键词】膝关节骨性关节炎;膝关节;有限元建模;生物力学

【中图分类号】R318.01

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)03-0382-07

Three-dimensional finite element modeling and mechanical analysis of knee joint in patients with mild knee osteoarthritis

ZHOU Taoyong¹, YANG Yongsheng¹, LU Ning², TANG Hao², YANG Yandong², HAN Xiechuan¹

1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Department of Orthopedics, the Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650500, China

Abstract: Objective To establish a three-dimensional finite element model of knee joint in patients with mild knee osteoarthritis in the absence of CT and MRI with thin layer thickness, and to analyze the stress distributions of the tibial plateau. **Methods** A female patient with mild knee osteoarthritis was selected as the study object, and received serial CT scan from pelvis to distal tibia of fibula. The obtained files in DICOM format were imported into Mimics software for extracting the bony structures of knee joint through threshold segmentation, and then optimizing the extracted structures with Edit Masks, Cavity Fill and Region Grow. The generated model of bony structures was imported into 3-matic for smoothing and wrapping, and Geomagic Wrap was used for bony structure processing with mesh doctor inspection, surface defect repair and surface fitting. The cartilages, meniscus and ligaments were established by contour extension, and assembled with bony structures in SolidWorks in the way of origin coincidence. After defining material properties and contact relationships, meshing, and setting constraints and loads in ANSYS software, the stress distributions of the tibial plateau when standing with both legs were analyzed. **Results** A complete knee joint model including bony structure, cartilage and ligament was successfully established. When standing with two legs, the peak value of contact stress was about 1.21 MPa, and the maximum stress was 0.72 MPa at the medial middle of tibial plateau and lateral tibial plateau. The 62.7% and 37.3% of the total load were borne by the inner and outer compartments. **Conclusion** The model of the total knee joint is established with CT extraction and software rendering, and the finite element analysis results meet clinical expectations, indicating that the model established by the proposed method is reliable and can be used for follow-up research.

Keywords: knee osteoarthritis; knee joint; finite element modeling; biomechanics

【收稿日期】2023-10-24

【基金项目】国家自然科学基金(52165067)

【作者简介】周陶勇, 博士, 讲师, 研究方向: 结构设计与力学分析, E-mail: kmzty@163.com

前言

膝关节是人体最大最复杂的关节,是人体支撑体质量、进行日常运动的重要关节之一。可由于其独特的结构,膝关节在提供灵活性的同时必须承受巨大的负荷。这导致膝关节在使用过程中内侧间室比外侧间室承受更大的压力,从而引发软骨磨损等问题,导致疼痛和僵硬,进而促使膝关节骨性关节炎(Knee Osteoarthritis, KOA)的发展^[1]。KOA作为一种慢性疾病,通常会随着时间的推移逐渐恶化。因此,尽早治疗对于KOA患者非常重要,早期治疗可以减缓疾病的进展、减轻疼痛、保护关节功能、降低手术风险,并预防潜在的并发症^[2]。

在治疗之前,通常会进行影像学检查,包括X射线、磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)或CT扫描,这些检查能提供有关关节结构和骨骼状况的详细信息,以评估疾病的严重程度^[3]。但由于传统的X射线、MRI和CT扫描对可视化的限制,只能提供二维或部分三维影像,限制了医生对解剖结构的全面理解^[4-5]。在某些情况下可能无法提供足够的精度和解剖学细节,如个体的骨结构、关节形状或软组织分布等,这可能导致医生对于复杂结构的理解不足,难以进行高级的手术规划和模拟,对于个性化治疗计划可能不够理想。因此,通过三维建模和有限元分析已成为补充和改进传统方法的有力工具,特别是在需要更深入的解剖学信息和个体化治疗时^[6-7]。在以往文献中,对膝关节的三维重建主要是依靠层厚较薄的CT和MRI文件,但拍摄层厚较薄的图像通常需要更多的扫描时间,同时更多的射线照射会对患者健康造成潜在风险,医疗成本和时间成本较高,因此传统的完全基于图像扫描的有限元建模方式在实际的研究中还是存在一定的局限性。

本研究基于CT断层扫描数据构建膝关节的骨性结构,并通过3-matic软件创建软骨、半月板以及相关韧带,探讨了KOA轻症患者全膝关节模型的构建,模拟人双腿站立下的工况,为医生评估患者病情提供力学方面的参考,也为后续更复杂的有限元分析提供基础。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本文采用昆明医科大学第二附属医院配置的64排螺旋CT机(GE公司,美国)对一名患有轻度KOA的女性患者进行自盆骨至腓骨胫骨远端连续断层扫描。扫描过程中要求志愿者平卧并保持静止,扫描电压120 kV,扫描电流250 mA,扫描层厚2 mm,共得到健

康志愿者的1130层CT断层扫描数据,均以DICOM格式存储,此外也进行了MRI影像采集。本研究已获得昆明医科大学第二附属医院伦理委员会审核批准,实验前患者已知晓并签署知情同意书。

1.2 研究方法

1.2.1 CT数据导入及图像方位调整 将DICOM格式的CT断层扫描数据一次性导入至Mimics 21.0(Materilise公司,比利时)中,在IMAGE模块中通过Change Orientation手动调整至正确的方位(图1)。

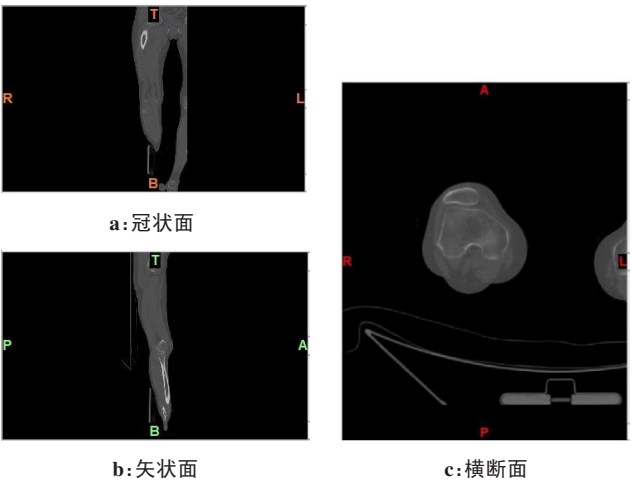


图1 调整图像方位
Figure 1 Adjusting image orientation

1.2.2 基于阈值分割获取骨性结构 阈值是用来区分图像中不同密度或强度区域的界限。医学图像通常包含不同密度或强度的组织和结构,如骨骼、软组织、液体等^[8]。在Mimics中对不同的组织结构都有一个默认的阈值范围,但过高或过低的阈值选择可能会导致错误的分割结果。如果阈值设置太高,可能会错过某些结构或产生漏洞;如果阈值设置太低,可能会将一些不相关的区域如噪点一同分割^[9]。因此选择合适的阈值有助于最小化这些错误,采用Draw Profile Line来设定合适的分割阈值。在视图中绘制一条穿过骨头的直线(图2a),然后沿着这条直线会产生一个强度截面,并生成一个沿剖面线像素灰度值的曲线图,点击Start thresholding后会显示两条水平阈值分割线,拖动分割线后选择合适的阈值范围并保存(图2b),生成骨性结构蒙版(Mask),最后调整的阈值为226~2081 HU(图2c)。选择适当的阈值可以帮助区分CT中不同的区域,并在进一步的分析之前对图像数据进行预处理,包括去除噪声、突出显示感兴趣的区域或排除不相关的信息,使得分割更加精确,减少后续手动编辑蒙版的工作量,从而提高工作效率并减少人为误差。

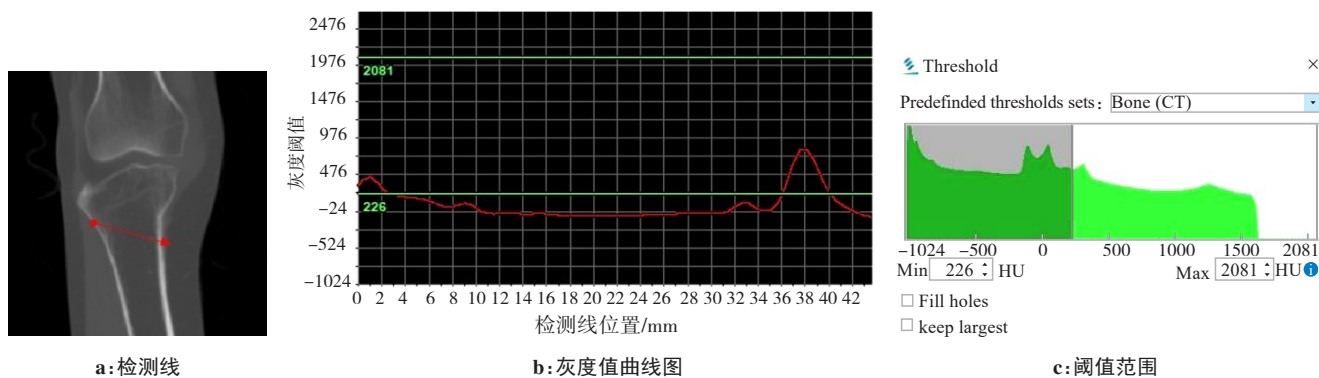


图 2 设定阈值范围

Figure 2 Setting threshold range

1.2.3 蒙版编辑 初次生成的蒙版存在噪声和一些不规则的边界,某些部位可能还存在失真现象,这些缺陷和问题都会对蒙版的准确性产生不利影响,导致蒙版无法准确地分割,因此需手动对蒙版进行后处理和编辑,以改善蒙版的质量和准确性。使用 Mimics 的蒙版编辑工具 Edit Masks(编辑蒙版)和 Multiple Slice Edit(多层编辑)对冠状面、矢状面和横断面 3 个视图中的图像进行逐层处理,删除股骨、胫骨、腓骨、髌骨外部多余的像素点,对一些不完整或不准确的边界,通过添加或删除像素点的方式逐层矫正,确保在模型中尽可能准确地区分骨性结构和软组织,同时保留正常解剖结构的完整性。在处理好边界存在的缺陷使其封闭后,使用 Cavity Fill(腔体填充)和 Smart Fill(智能填充)工具对所选面中的孔洞和空腔进行全局和局部填充。如果孔洞和空腔没有被恰当地处理,可能会被误认为是实际存在的结构,不利于后续的建模和有限元分析。蒙版编辑与空腔填充前后的对比如图 3 所示。

版中包含股骨、胫骨、腓骨、髌骨等多个离散的部分,而在后续的有限元分析中对不同的部位需要赋予不同的物理属性,因此需要通过区域增长功能将这几部分骨骼分别提取出来,以不同的颜色进行标记,生成新的蒙版,如图 4 所示。同时区域增长功能可以通过考虑相邻像素之间的相似性来抵抗噪声的干扰,这意味着对于噪声较多的医学图像也能够产生相对准确的分割结果。

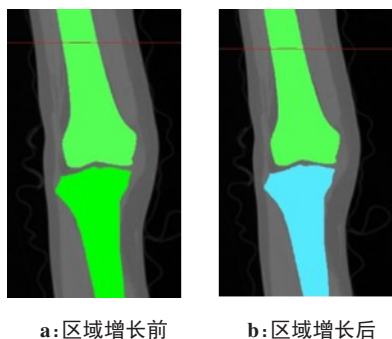


图 4 区域增长前后对比

Figure 4 Comparison before and after region grow

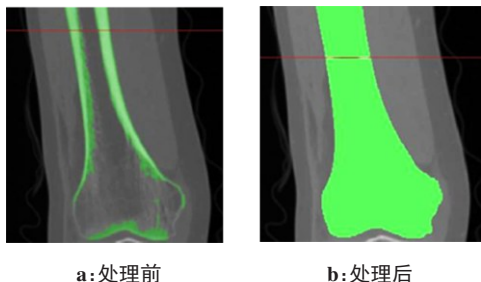


图 3 经过蒙版编辑与空腔填充处理前后对比

Figure 3 Comparison before and after mask editing and cavity filling

1.2.4 区域增长并生成三维模型 Region Grow(区域增长)可以对初生阈值分割蒙版上彼此不相连的分割区域进一步细分亚组。由于阈值分割生成的蒙

1.2.5 三维模型重建与优化 在完成膝关节骨性结构的分割之后,利用 Mimics 中的计算 3D 功能(Calculate part)生成初始三维模型,设定重建质量参数(Quality)为 High(高质量),获得包括完整股骨、完整胫骨、完整腓骨以及髌骨的膝关节三维模型,实现由二维蒙版到三维的转化(图 5)。

初步建立各部分骨骼的三维模型在视觉效果上尤显粗糙,因此将生成的模型复制到 3-matic 中做进一步的优化处理。3-matic 提供了曲面修复、模型编辑、拓扑优化、模型分析等多种功能,帮助编辑、优化和分析三维模型,以满足各种设计和工程需求。首先使用 Fix Wizard(修复向导)自动检测和修复三维

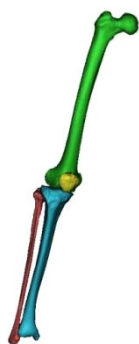


图5 膝关节骨性结构的三维模型

Figure 5 Three-dimensional model of bony structure of the knee joint

模型中的几何缺陷和问题,如孔洞、不连续性、重叠面、自交、几何扭曲等^[10]。然后使用Smooth(光滑)和Wrap(包覆)功能对模型表面进行改善,Smooth可以帮助修复模型中的几何缺陷,选择合适的smooth factor(光滑系数),减轻模型中的不规则或尖锐的几何特征,修复模型中的几何缺陷,从而改善模型的整体质量。其中光滑系数的设置会直接影响模型的光滑程度,较大的光滑系数可以提供更好的光滑效果,但同时也会更多地改变模型的几何形状;Wrap操作会创建所选实体的包覆表面,过滤小杂物或关闭小孔。使用Smooth和Wrap功能对股骨、胫骨、腓骨、髌骨模型进行三维优化,以STL格式文件分别保存导出。

1.2.6 基于 Geomagic Wrap 的模型结构优化与 NURBS 曲面化 在Mimics中生成的三维模型是由三角面片包围而成的空腔结构,需要在逆向工程软件Geomagic Wrap中曲面化。将STL格式文件导入到Geomagic Wrap中进入多边形处理阶段,重新划分网格后使用网格医生检查并修复模型中存在的非流形边、自相交、高度折射边、钉状物、小组件、小通道以及小孔,确保模型的质量和完整性。对于一些未被处理的孔洞、破碎的边缘或存在缺陷的表面,可以使用松弛、快速光顺、砂纸等工具进行处理直至所有曲面片问题清零。

多边形阶段之后进入精确曲面阶段。首先使用探测轮廓线对模型的轮廓进行自动检测,然而由于自动检测产生的轮廓线可能存在交叉或混乱,从而影响局部特征的识别准确性。因此,根据模型的特点,选择手动绘制轮廓区域,以获得所需的理想轮廓线。然后在曲面片模块中使用构造曲面片功能生成曲面,利用修理曲面片功能检查并修复曲面网格中存在的相交路径、较小的曲面片角度、高角度点等问题后以20分辨率来构造格栅。最后使用拟合曲面功

能生成模型的实体曲面,如图6所示,以IGS格式保存导出。

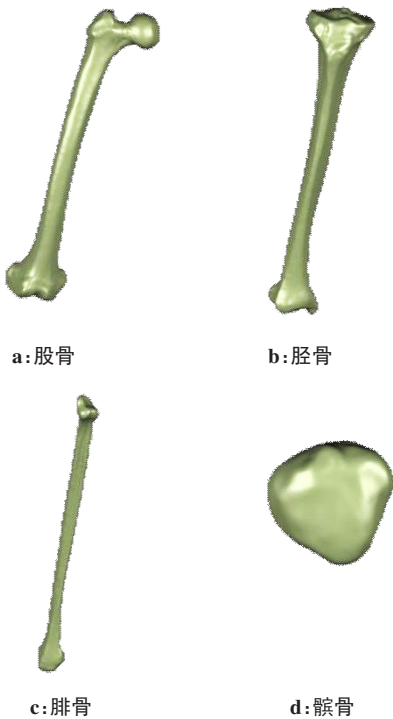


图6 膝关节骨性结构曲面重构结果

Figure 6 Surface reconstruction of the bony structure of the knee joint

1.2.7 软骨的建立 由于软骨的结构密度相对较低,CT的分辨率不足以准确显示微小的结构,提供不了足够详细的信息^[11-12]。若要从MRI文件中直接提取软骨和韧带,一般要求MRI文件层厚要在1 mm以下。而本研究中的CT及MRI文件较厚,若直接导入至Mimics中的话会导致提取出来的软骨和韧带严重失真,无法满足建模及后续分析的要求。且在MRI中观察到患者的软骨并未发生明显的磨损,因此,本研究采用3-matic对膝关节中的相关软骨及韧带进行重构。

以轮廓延展的思路来建立软骨,以胫骨平台软骨为例,在3-matic中打开优化过的胫骨模型,参考CT和MRI文件来确定软骨的大致位置、形状等。使用Creat Curve(创建曲线)功能,选择曲线创建方式为Smooth curve(平滑曲线),以胫骨平台的内侧和外侧分别为基准面,分别绘制出胫骨平台内外侧软骨的轮廓,该轮廓就是软骨的基本形状,将绘制出的轮廓独立复制出来,使用Uniform Offset(均匀偏移)功能偏移软骨的轮廓形成实体,并使用Smooth对生成的软骨表面进行一定的优化。接下来用类似的步骤构建出股骨软骨、腓骨软骨、髌骨软骨以及半月板。值

得注意的是,以这种方式构造的软骨之间可能会存在一些不符合解剖结构的重合,因此用布尔操作处理这些不合理的部分。使用Sweep-Loft(扫略-放样)来制作韧带,首先在韧带连接的两块骨上绘制接触面的轮廓曲线,即韧带的起止点,然后指定一条路径使一个截面延伸到另一个截面并生成特征,用类似的方法制作髌韧带、内外侧副韧带和前后交叉韧带。

将制作好的软骨及韧带分别保存,导入到GeomagicWrap中对表面进行松弛、快速光滑等处理后拟合NURBS曲面,以IGS格式保存导出。

1.2.8 基于SolidWorks的全膝关节装配 将IGS格式保存的股骨、胫骨、腓骨、髌骨、软骨和韧带模型导入到SolidWorks2020软件中,由于所有模型都是基于同一份CT文件的坐标系进行提取或者制作的,因此采用原点重合的方式装配在一起,得到包含有软骨、半月板、韧带的全膝关节模型(图7),并以STEP文件格式保存。



图7 全膝关节模型
Figure 7 Total knee model

1.3 全膝关节模型有限元前处理

前处理过程指的是在进行有限元分析之前所需的一系列准备工作和步骤,主要包括几何建模、网格生成、材料属性定义、边界条件设定、网格质量控制、网格适应性处理以及信息汇总等步骤。前处理是有限元分析的第一阶段,它的主要目标是将实际工程问题转化为适合有限元分析的数学模型,前处理的质量对于分析结果和可靠性至关重要。

1.3.1 设置材料属性 设置准确的材料属性是进行有限元分析的重要步骤之一,确保模拟的准确性和可靠性。在骨性结构(股骨、胫骨、腓骨、髌骨)的材料赋予中,由于骨的弹性模量远高于软组织的弹性模量,导致骨材料性质的变化对软组织的力学行为几乎没有影响,因此以往对膝关节的有限元分析研究中会将骨骼视为刚

体。但考虑到本研究主要是观察胫骨平台上的力学特性,因此将膝关节中的骨性结构视为线弹性各向同性材料,弹性模量为12 000 MPa,泊松比为0.3^[13]。由于韧带是一种软组织,具有非线性、各向异性和黏弹性的特性^[14],在有限元分析中通常被假设为超弹性材料和线弹性材料。Donzelli等^[15]指出粘弹性材料的软骨和弹性材料的软骨在承受负载后短期内都没有显著变化。且大量研究也已经证明,在进行小变形分析时,可以将软骨以及韧带简化为连续、均匀和各向同性的线弹性材料,有助于减少计算复杂性。膝关节中各部分材料属性如表1所示^[13,16]。

表1 膝关节中各部分材料属性
Table 1 Material properties of various parts in the knee joint

材料	弹性模量/MPa	泊松比
骨性结构	12 000	0.30
半月板	59	0.49
软骨	5	0.46
髌韧带	240	0.40
内外侧副韧带	70	0.40
前后交叉韧带	250	0.40

1.3.2 设置接触关系并划分网格 设置膝关节中各部分间的接触关系。软骨与骨性结构接触的地方如内外侧胫骨软骨与胫骨平台、股骨软骨与股骨间设置为绑定接触;而膝关节中由于关节滑液的存在,使得软骨与半月板间的摩擦很小,可以忽略不计,因此将股骨与胫骨之间软组织的接触关系设置为无摩擦接触,包括股骨软骨与半月板,半月板与胫骨平台软骨之间。韧带与其在骨骼上的附着点设置为绑定接触。

网格划分以四面体单元划分,四面体网格适用于具有复杂几何形状模型,更容易提高网格质量^[17-19],设置股骨、胫骨、腓骨、髌骨的网格尺寸为2 mm,软骨、半月板、韧带的网格尺寸为0.8 mm。模型节点总数1 180 710,单元总数774 014。划分网格后的膝关节模型如图8所示。

1.3.3 设置边界条件与载荷 本研究模拟了人在双腿站立下的工况。Kutzner等^[20]测试了5例双腿站立下的胫股接触力,发现载荷为1.07倍的体质量。而股骨顶端受到的压力约为体质量的62%^[21],在股骨头上施加335 N的力,并对胫骨远端和腓骨远端进行6个自由度的约束^[1]。

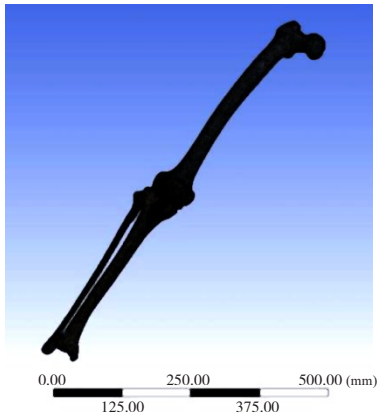


图8 划分网格后的膝关节模型
Figure 8 Knee model after meshing

2 结果

2.1 建立KOA患者膝关节模型

本研究针对缺少层厚较薄的CT和MRI文件的情况下对KOA患者膝关节进行三维重建,建立包括骨性结构、软骨、韧带的完整膝关节模型,确保在有限元分析中力学性能的完整性。

2.2 应力分析结果

加载人在站立状态下的载荷,通过观察胫骨平台上的应力分布来研究膝关节内外侧间室的承载情况。接触应力峰值约为1.21 MPa,位于胫骨平台内侧中部,胫骨平台外侧的最大应力为0.72 MPa,内外侧间室分别承担总载荷的62.7%和37.3%,外侧峰值应力达到了内侧峰值的1.68倍。正常膝关节由于其结构特性内侧会比外侧承受更多的力,而KOA患者由于膝内翻导致其内侧间室会承载比正常膝关节更大的力,应力云图如图9所示,符合临床预期。

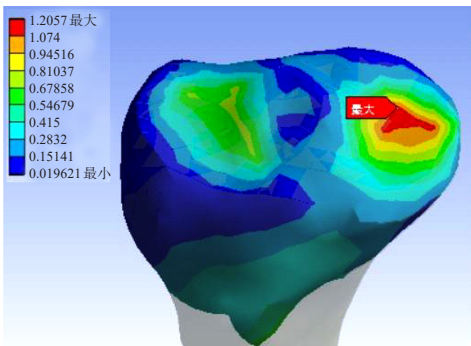


图9 胫骨平台内外侧应力分布对比
Figure 9 Comparison of stress distribution at the medial and lateral tibial plateau

3 讨论

随着计算机性能的不断提高,有限元分析现在

能够更准确地模拟复杂的生物组织,并且有限元分析技术能够进行虚拟实验,减少对生物体的实际实验和动物实验的需求。膝关节作为人体最复杂的关节之一,其生物力学行为非常复杂,膝关节模型的结构完整性对研究膝关节内生物力学环境有重要的意义^[22]。

在建立完整的膝关节三维模型上,本研究通过CT数据提取和借助软件建立软组织的方式来建立完整的KOA患者膝关节。与传统研究中只对骨性结构进行建模分析或是通过层厚较薄的CT和MRI数据进行建模的方式相比,本研究使用的建模方法一是对软骨、韧带均进行了建模,保证了模型的完整度;二是对原始数据的要求大幅度降低,对从CT提取出来的骨骼,通过Mimics、3-matic和Geomagic Wrap几个专业软件的处理,使模型质量达到建模和分析的要求。软骨和韧带由于在MRI中未观察到明显的磨损,则通过观察其形状和附着点的方式来进行重建。层厚较薄的影像数据固然能得到高精度的模型,但同时也会带来更高的医疗成本和时间成本。因此,在对KOA轻症患者膝关节的研究中,该建模方式也为后续的研究提供一种可靠的思路。

本研究对建立的患者膝关节模型模拟了人在双腿站立下的工况,研究骨性关节炎对胫骨平台内外侧的负载产生的影响。与李硕等^[23]模拟双腿站立下的工况研究相比,胫骨平台上应力分布范围比较接近。而胫骨平台上的受力,正常膝关节上的内侧应力峰值高于外侧应力峰值,本研究中KOA患者的外侧峰值应力达到了内侧峰值的1.68倍,这主要是因为骨性关节炎前期,本身就存在应力集中的胫骨平台内侧应力又进一步加剧,仿真的结果符合临床预期。患者可通过胫骨高位截骨术来矫正膝内翻,以此来缓解胫骨平台内侧的负载,使内外侧受力达到相对均衡的状态。本研究中的建模方式和力学分析也能为后续的术后模型建立及力学分析提供一定的参考。

如今,有限元分析技术在膝关节生物力学研究中扮演的角色愈发重要,有限元分析技术可以用来模拟和分析膝关节在不同运动条件下的生物力学特性。通过有限元分析技术与医疗影像技术结合,使个性化医学成为可能,可以根据患者的特定解剖结构和生物力学特性来定制治疗计划,帮助医生识别和评估手术中潜在的风险,减少手术风险,并不断推动医学领域的创新和进步。

【参考文献】

[1] Trad Z, Barkaoui A, Chafra M, et al. Finite element analysis of the

- effect of High Tibial Osteotomy correction angle on articular cartilage loading[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2018, 232(6): 553-564.
- [2] 朱佳旺, 陈德生, 王同富, 等. 内侧开放楔形胫骨高位截骨术后近期并发症的临床分析[J]. *中华外科杂志*, 2020, 58(6): 447-451.
- Zhu JW, Chen DS, Wang TF, et al. Analysis of complications after medial opening wedge high tibial osteotomy[J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2020, 58(6): 447-451.
- [3] 方威扬, 林东鑫, 寇万福, 等. 医学图像三维重建系统的研究进展[J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(7): 823-827.
- Fang WY, Lin DX, Kou WF, et al. Advances in medical image three-dimensional reconstruction system[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2022, 39(7): 823-827.
- [4] Liu S, Peng J. Optimization of reconstruction of 2D medical images based on computer 3d reconstruction technology[J]. *Journal of Digital Information Management*, 2015, 13(3): 142-146.
- [5] Hakki OK, Ebubekir T. Three-dimensional imaging techniques: a literature review[J]. *Eur J Dent*, 2014, 8(1): 132-140.
- [6] Li XC, Zhang JY, Shi WQ, et al. Application of three-dimensional image reconstruction technology based on high-resolution CT in pyloroplasty[J]. *Transl Androl Urol*, 2021, 10(3): 1314-1320.
- [7] 傅栋. 三维医学影像交互式控制系统在骨科数字仿真与有限元建模的应用[D]. 广州: 南方医科大学, 2007.
- Fu D. Application of 3D medical image interactive control system in digital simulation and finite element modeling of Orthopedics[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2007.
- [8] 赵峰, 高勃, 刘震侠, 等. Dicom标准和Mimics软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. *西南国防医药*, 2005, 15(5): 479-481.
- Zhao F, Gao B, Liu ZX, et al. Establishment of a three-dimensional finite element model of mandible with Dicom and Mimics software[J]. *Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China*, 2005, 15(5): 479-481.
- [9] 苏奎, 赵若晗, 刘博强, 等. 基于Mimics的CT三维重建应用分析[J]. *软件*, 2020, 41(3): 66-68.
- Su K, Zhao RH, Liu BQ, et al. Application of CT three-dimensional reconstruction based on Mimics[J]. *Software*, 2020, 41(3): 66-68.
- [10] Niu JL, Qin XS, Bai J, et al. Reconstruction and optimization of the 3D geometric anatomy structure model for subject-specific human knee joint based on CT and MRI images[J]. *Technology Health Care*, 2021, 29(S1): 221-238.
- [11] Beeler S, Vlachopoulos L, Jud L, et al. Contralateral MRI scan can be used reliably for three-dimensional meniscus sizing-retrospective analysis of 160 healthy menisci[J]. *Knee*, 2019, 26(5): 954-961.
- [12] Wadhwa V, Malhotra V, Xi Y, et al. Bone and joint modeling from 3D knee MRI: feasibility and comparison with radiographs and 2D MRI[J]. *Clin Imaging*, 2016, 40(4): 765-768.
- [13] 张秋月, 张春秋, 葛洪玉, 等. 膝关节三维有限元模型的建立及分析[J]. *天津理工大学学报*, 2015, 31(3): 27-30.
- Zhang QY, Zhang CQ, Ge HY, et al. Establishment of 3-dimensional finite element model of human knee joint and biomechanical analysis[J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2015, 31(3): 27-30.
- [14] Doblaré M, Cueto E, Calvo B, et al. On the employ of meshless methods in biomechanics[J]. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2005, 194(6-8): 801-821.
- [15] Donzelli PS, Spilker RL, Ateshian GA, et al. Contact analysis of biphasic transversely isotropic cartilage layers and correlation with tissue failure[J]. *J Biomech*, 1999, 32: 1037-1047.
- [16] 张刘会, 刘丹平. 膝关节三维有限元模型建立和验证及模拟后交叉韧带重建术[J]. *生物医学工程与临床*, 2020, 24(5): 508-513.
- Zhang LH, Liu DP. Construction and verification of three-dimensional finite element knee joint model and simulation scheme of posterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Biomedical Engineering and Clinical*, 2020, 24(5): 508-513.
- [17] 崔晓倩, 王辅忠, 张慧春. 膝关节股骨远端软骨硬化前后力学性能分析[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(1): 25-29.
- Cui XQ, Wang FZ, Zhang HC. Analysis on mechanical properties of cartilage in distal femur of knee joint in both normal and sclerosis cases[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2015, 30(1): 25-29.
- [18] 马雪梅, 张春秋, 高丽兰, 等. 骑行时不同屈曲角度膝关节软骨受力分析[J]. *中国生物医学工程学报*, 2016, 35(1): 119-123.
- Ma XM, Zhang CQ, Gao LL, et al. The analysis of stress on knee cartilage in different flexion angles during riding[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2016, 35(1): 119-123.
- [19] Duraisamy S, Go Y, Etsuo C, et al. Effects of a valgus unloader brace in the medial meniscectomized knee joint: a biomechanical study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 44.
- [20] Kutzner I, Heinlein B, Graichen F, et al. Loading of the knee joint during activities of daily living measured *in vivo* in five subjects[J]. *J Biomech*, 2010, 43(11): 2164-2173.
- [21] 范洪辉, 李冬松, 周振平, 等. 不同骨质密度下生物型及骨水泥型股骨假体置入后的三维有限元分析[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2007, 13(6): 465-467.
- Fan HH, Li DS, Zhou ZP, et al. Three-dimensional finite element analysis of uncemented and cemented femoral prostheses implanted under different bone densities[J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Injury*, 2007, 13(6): 465-467.
- [22] 董跃福, 董英海, 胡广洪, 等. 准确构建个体化膝关节有限元解剖模型的方法[J]. *临床骨科杂志*, 2011, 14(2): 198-203.
- Dong YF, Dong YH, Hu GH, et al. A method for accurate reconstruction of subject-specific anatomical finite element model of knee joint[J]. *Journal of Clinical Orthopaedics*, 2011, 14(2): 198-203.
- [23] 李硕, 苏鹏, 张力, 等. 三维重建和有限元分析股骨髁上截骨对矫治膝内翻有积极作用[J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26(6): 858-863.
- Li S, Su P, Zhang L, et al. Positive effect of supracondylar femoral osteotomy on the correction of knee varus based on three-dimensional reconstruction and finite element analysis[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2022, 26(6): 858-863.

(编辑: 薛泽玲)