

膝关节三维有限元模型的构建及生物力学分析^①

李杏芮¹, 陈清¹, 盛华均¹, 杨美¹,
吕发金², 李信友², 梁熙³

1. 重庆医科大学解剖学教研室, 重庆 400016; 2. 重庆医科大学附属第一医院放射科, 重庆 400042;
3. 重庆医科大学附属第一医院骨科, 重庆 400042

摘要: 目的: 构建一个能在普通计算机上使用的膝关节三维有限元模型, 并进行初步生物力学分析, 为个性化假体设计及 3D 打印提供仿真基础. 方法: 对健康成人志愿者进行 CT 扫描, 导入 Mimics 软件中建立三维模型, 再导入 ANSYS 软件中, 通过定义单元类型、选择材料属性和划分网格, 建立三维有限元模型. 结果: 三维有限元模型逼真、清晰、数据量小, 适用于普通计算机; 力学分析结果显示膝关节在伸直位时主应力最小. 结论: 基于 Mimics 及 ANSYS 软件, 成功构建了能够在个人计算机上应用的膝关节三维有限元模型, 对该模型生物力学分析显示, 在个性化膝关节假体设计时, 其形态应以病人自身膝关节伸直位为参考依据.

关键词: 膝关节; 三维重建; 有限元分析; 生物力学

中图分类号: Q985

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)05-0073-05

膝关节是人体六大关节之一, 由于结构复杂, 运动量大, 其伤病率位居所有关节之首, 而膝关节的病变则会严重影响患者的活动功能及生活质量. 因此, 了解膝关节的生物力学性质和行为, 有助于更好地理解膝关节各类损伤的转归及关节退行性病变的原因. 个性化膝关节三维有限元模型, 对正确建立各类膝关节伤病后的康复方案、进行各类膝关节矫形手术、设计及精确安置膝关节假体都具有重要意义. 有关三维有限元模型重建的研究较多, 但重建方法^[1-7]和所采用的数据源各不相同, 大部分模型建立以后数据都过于庞大, 无法在普通计算机上分析使用. 本研究利用计算机图像处理软件 Mimics 和有限元分析软件 ANSYS, 通过对正常右侧膝关节计算机断层扫描(CT)数据, 拟建立一个能够在普通计算机上使用的膝关节三维有限元模型, 同时进行初步生物力学分析, 为个性化膝关节假体设计及 3D 打印奠定基础.

1 材料与方法

1.1 研究对象

选取女性志愿者 1 例, 年龄 22 岁, 身高 168 cm, 体质量 55 kg, 既往无膝关节疾病及外伤史, 对其右侧膝关节行 CT 薄层扫描, 知情并同意本研究使用其膝关节扫描数据.

1.2 设备和软件

1.2.1 设备

德国 SIEMENS 公司 64 排螺旋 CT 扫描机; GE ADW 4.2 工作站; 个人计算机.

^① 收稿日期: 2014-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(81000566); 重庆市教委项目(KJ120313).

作者简介: 李杏芮(1987-), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事临床应用解剖与断层解剖学研究.

通信作者: 盛华均, 副教授, 硕士研究生导师.

1.2.2 应用软件

比利时 Materialise 公司的交互式医学图像控制系统(Materialise's Interactive Medical Image Control System, Mimics)10.01; 美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析软件(Analysis system, ANSYS)10.0.

1.3 膝关节 CT 原始数据采集

女性健康志愿者取仰卧位, 右侧膝关节于伸直位行 CT 扫描, 得到层厚 0.625 mm, 层距 0.4 mm 连续二维断层图像 1 200 张; 将所得断层数据在 GE ADW 4.2 工作站存储为 DICOM 3.0 格式并进行刻盘.

1.4 构建及检验膝关节三维模型

将膝关节 CT 数据导入 Mimics, 标记正确方位; 设定阈值, 利用区域增长功能以胫骨图像中任意像素点为基本点创建分割体, 建立模型的骨骼热区; 点击计算轮廓线, 使用 Cavity Fillfrom Polylines 填补空洞; 用编辑蒙板逐层删除位于其他部位具有和胫骨相同灰度的标记, 并补全胫骨中未被自动标记的像素, 使用计算模型功能计算胫骨三维模型; 通过 FEA 模块中面网格划分(Remesh)对 3D 模型面网格进行优化, 经检验, 本实验优化的 Remesh 参数设定方法能够真实保留膝关节几何形态, 且数据量小.

1.5 生物力学分析

将胫骨模型导入 ANSYS, 设定单元类型, 进行网格划分, 采用多种材料赋值方法, 至此三维有限元模型建成.

设定双腿站立伸直位, 对应垂直载荷是人体体质量的 0.43 倍^[8], 受试者体质量为 55 kg, 则对应垂直载荷为 296 N. 通过定义位移约束和压力载荷, 进行生物力学分析.

2 结果与分析

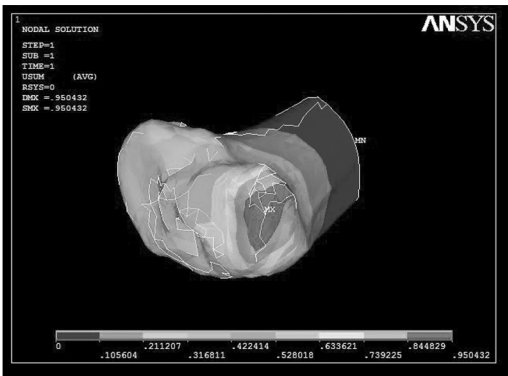
1) 通过 Mimics 软件和 ANSYS 软件, 成功在个人计算机上建立了节点数为 22 051, 单元数为 12 837 的膝关节胫骨平台三维有限元模型.

2) 通过相关参数检验模型, 错误数(Warning count)为 0, 需改进率(Warn/Err)为 0, 证明本研究方法所建立的模型准确度较高, 可以用作进一步的生物力学分析(表 1).

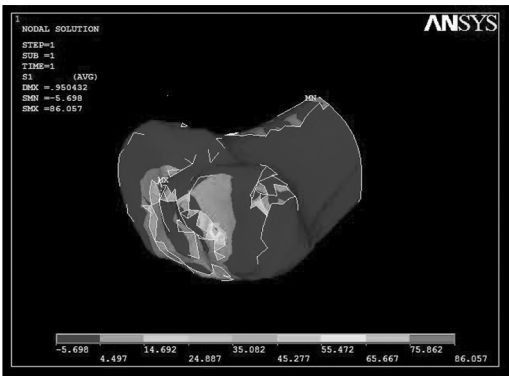
表 1 三维有限元模型的相关参数检验

	测试数	警告数	错误数	需改进率/%
长宽比率	12 837	0	0	0.00
最大三角	12 837	0	0	0.00
Jacobian 比率	12 837	0	0	0.00
任意	12 837	0	0	0.00

3) 通过静态力学分析可见, 主应力为 86.057 MPa, 最大等效应力主要分布于胫骨内侧平台上(图 1a、图 1b).



(a) 添加载荷后胫骨位移云图上面观



(b) 添加载荷后胫骨第一主应力云图上面观

图 1 ANSYS 结果显示

4) 模拟膝关节屈曲运动, 从 0° , 30° , 45° , 60° 和 90° 等角度进行载荷力加载分析试验(表 2), 膝关节在伸直位时主应力最小, 屈曲成 0° 的时候主应力最大(图 2).

表 2 膝关节不同角度最大主应力值

角度	0°	30°	45°	60°	90°
最大值/MPa	176.861	170.04	165.432	158.115	86.057

3 结论与讨论

3.1 结果的可靠性

该模型与以往的模型^[4,8]及临床研究的数据基本相近, 说明本研究方法建立的模型是有效和可靠的. 在建模和生物力学分析中, 本研究使用方法使用薄层 CT 获取断层影像, 断层形态结构与数据完整. 在 Mimics 中重建的模型, 除局部单元细划, 使所建模型光滑、无锐角以外, 并未做大范围的修改, 因此本实验建立的膝关节有限元模型与实体相比有较好的几何相似性; 本研究模型采用的多种材料赋值方法, 根据灰度值及骨密度对模型进行赋值, 所获取的应力仍能与实际情况保持较好的力学相似性; 而有限元模型的边界约束条件和压力载荷都是比较灵活的设定, 本实验模拟了膝关节的静力分析, 根据模型状况、实验内容及相关的文献资料制定, 具有较好的边界约束性和载荷相似性.

3.2 三维建模的方法比较

3.2.1 轮廓线填充方法

传统方法中建立三维模型时, 需一层一层填补空洞, 而本研究使用的计算轮廓线和 Cavity Fillfrom Polylines 填补空洞的方法, 可以自动生成大部分的填充, 无需一层一层填补空洞, 可以节省大量时间; 且使用这种方法生成的模型, 不是手动勾画, 也增加了模型的准确性.

3.2.2 优化的 Remesh 参数设定方法

将没有进行 Remesh 优化的模型直接导入有限元软件中进行分析, 不仅耗费时间, 而且得到的计算结果也不一定准确, 再加上大部分个人计算机内存的限制, 数据庞大后很难处理, 常常提示错误. 但是对 Remesh 的过度设置, 又会引起模型失真较大的危险. 如何在其中选择一个合适的参数值显得非常重要. 在众多的参考文献中, Remesh 参数设定没有统一的标准. 本研究经过大量参数的尝试, 探索出了具有自己特色的 Remesh 参数设定方法, 可以最真实保留膝关节几何形态, 并且确保模型能够在个人计算机上进行生物力学分析(图 3a、图 3b).

从体积, 表面积, 三角面片和节点数量来分析(表 3), 体积和表面积的相似性很高, 说明模型和实体的差异性小; 而三角面片和节点数量的减少, 可节省分析时间. 该模型的体积和表面积都高于 95%, 而三角面片数量和节点数量却只有 Remesh 前的 5% 左右, 这证明本研究方法所建立的模型相似性高、数据量小, 适合用于个人计算机.

表 3 膝关节模型 Remesh 前后参数

	Remesh 前	Remesh 后	Remesh 前后比/%
体积/ mm^3	112 598.28	110 439.09	98.08
表面积/ mm^2	13 708.51	13 056.12	95.24
三角面片	38 788	2 152	5.54
节点数量	19 394	1 078	5.56

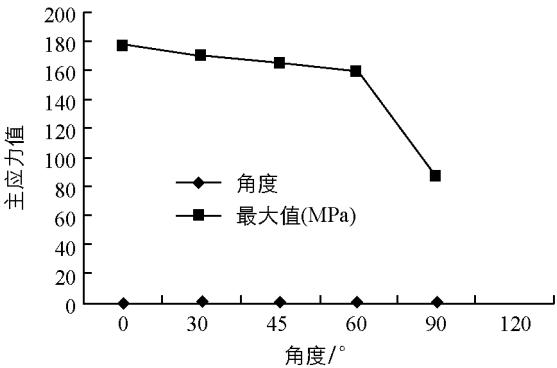


图 2 膝关节不同角度最大应力值折线图

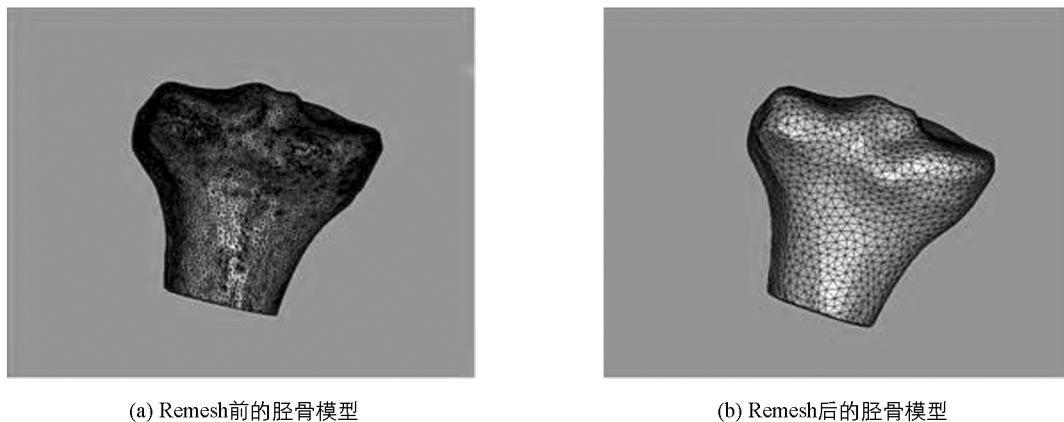


图 3 Remesh 前后的胫骨模型对比

3.3 不同角度应力分析的意义

最大主应力用来描述结构的实际受力情况,它的大小决定了结构是否出现裂缝和受剪切破坏.最大主应力越小,说明结构越安全.应用该模型,我们在普通计算机上模拟膝关节在不同屈曲角度施加载荷,载荷力的大小由体质量算出,使用力的分解方法从 0° , 30° , 45° , 60° 和 90° 等不同角度进行分析,结果显示膝关节屈曲运动中,在伸直位时主应力最小,随着屈曲角度的增加而增加,说明人膝关节在伸直位时最不易发生骨折或磨损.因此,在个性化膝关节假体设计时,其形态应以病人自身膝关节伸直位为参考依据.

4 展 望

对膝关节生物力学的研究一直是科学研究的热点,传统的膝关节生物力学研究主要是从尸体上进行,数据流失很大,而 CT, MRI 等二维图像不能进行生物力学研究.随着计算机技术的发展,越来越多的软件运用于医学研究,如何建立一个好的膝关节模型是生物力学研究的关键环节. Mimics 是三维重建最常用的软件之一,重建的三维模型可以导入专业有限元分析软件 ANSYS 进行进一步的分析处理. ANSYS 是最常用的有限元分析软件,可以模拟各种实验方案,实验时间短,增加设计功能,模型可重复使用,减少设计成本,节省材料消耗.运用新的轮廓线填充方法和科学严谨的 Remesh 参数设置,使用多种材料赋值方法,快速建立三维模型,该模型所占空间最小,具有高度几何相似性和力学相似性,适用于个人计算机,应用前景较广.特别是在骨关节领域,为临床医生虚拟手术的开展、关节功能康复研究和优化假体设计奠定基础;下一步可以进行胫骨或股骨对相应假体匹配的生物力学分析,以便将来在材料科学取得重大进展以后,开展个性化 3D 打印关节假体成为可能.

参考文献:

- [1] 侯 波,王 毅,沈宇辉. 膝关节动态有限元模型的力学分析 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2013, 17(22): 3998—4004.
- [2] BARBARA Z, TAMMY L, HAUT D. 3D Finite Element Model of Meniscectomy: Changes in Joint Contact Behavior [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2006, 128(1): 115—123.
- [3] LIU Xuan, ZHANG Ming. Redistribution of Knee Stress Using Laterally Wedged Insole Intervention: Finite Element Analysis of Knee-Ankle-Foot Complex [J]. Clinical Biomechanics(Bristol, Avon), 2013, 28(1): 61—67.
- [4] 靳 龙,胡迎春,靳剑桥,等. 基于 Mimics 和 Ansys 的人体膝关节生物力学分析 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(6): 208—212.
- [5] 彭鲤侨,张占磊,董亚贤,等. 基于 TKA 术前准备的 CAD 关节重建与假体建模 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2014, 12(6): 105—108.

- [6] 袁 平, 王万春. 膝关节三维有限元模型的建立及生物力学分析 [J]. 中南大学学报: 医学版, 2010, 35(1): 85—89.
- [7] 鲍春雨, 孟庆华. 基于有限元法人体膝关节生物力学模型的建立与分析 [J]. 武汉体育学院学报, 2010, 44(5): 56—66.
- [8] 张 文, 倪俊芳. 基于 ANSYS 研究人体膝关节生物力学模型 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 11—58.

Establishment and Biomechanical Analysis of a 3-D Finite Element Model of the Knee

LI Xing-rui¹, CHEN Qing¹, SHENG Hua-jun¹, YANG Mei¹,
LV Fa-jin², LI Xin-you², LIANG Xi³

1. Department of Anatomy, Laboratory of Forensic Medicine and Biomedicine Information of
Chongqing Medicine University, Chongqing 400016, China;

2. Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China;

3. Department of Orthopedics, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China

Abstract: Objective: To establish a three-dimensional finite element analysis model of the knee joint to be used on the ordinary computer and then to do a preliminary biomechanical analysis, which could provide a simulated foundation for personalized prosthesis design and 3-D printing. Methods: CT scan results of healthy adult volunteers were imported into Mimics software to set up a three-dimensional model, and then were imported into ANSYS software to establish the three-dimensional finite element model by defining a unit type, choosing material properties and meshing. Results: The three-dimensional finite element model was mimic and clear which could be used on the ordinary computer. Mechanics analysis results showed that the main stress on the knee extension position was minimum. Conclusion: Based on Mimics and ANSYS software, a three-dimensional finite element model of the knee joint was established successfully which could be applied on a personal computer. Biomechanical analysis of the model showed that in personalized design of the shape of the knee implant, the patient's own knee extension position should be taken for reference.

Key words: knee joint; three-dimensional reconstruction; finite element analysis; biomechanics

责任编辑 夏 娟

