

· 基础研究 ·

基于多模态图像配准技术构建半骨盆全髋关节有限元模型

杨鹏, 魏秋实, 陈镇秋, 王鼎, 陈达, 何伟, 张庆文

(广州中医药大学第一附属医院, 广东 广州 510405)

摘 要 **目的:**基于多模态图像配准技术利用 CT、MRI 图像建立半骨盆全髋关节有限元模型。**方法:**采集 1 位健康女性志愿者同一位位下的 CT 和 MRI 图像,以 DICOM 格式保存。先采用 Mimics16.0 医学影像软件和 Geomagic - Studio11 逆向工程软件以 CT 数据建立髌骨、股骨骨性三维模型,再利用 Solidworks 软件将骨性三维模型与 MRI 图像进行配准融合,重建与之匹配的髌白软骨和股骨头表面软骨三维模型,并在模型上标记髋关节周围韧带、肌肉附着点。将数据导入 Abaqus6.14 软件建立半骨盆全髋关节有限元模型,分析模拟双腿站立位单侧髋关节受力情况下(1.6 倍体重,800 N)髋关节应力分布情况。**结果:**建立的半骨盆全髋关节三维有限元模型,包含髌骨和股骨近端的皮质骨、松质骨、关节软骨、韧带和肌肉共 5 部分三维子模型,涉及 122 363 个单元、216 149 个节点。在 800 N 载荷下,髋关节应力大小和分布与以往研究结果相近。**结论:**基于多模态图像配准技术利用 CT、MRI 图像建立的半骨盆全髋关节有限元模型,能很好地模拟髋部骨骼、软骨的形态,并较为真实地反映髋关节的力学性能,具有一定的科研及临床价值。

关键词 髋关节;有限元分析;图像配准

Construction of finite element models of hemipelvis and total hip joint using multi - modality image registration technique

YANG Peng, WEI Qiushi, CHEN Zhenqiu, WANG Ding, CHEN Da, HE Wei, ZHANG Qingwen

The First Affiliated Hospital of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong, China

ABSTRACT **Objective:**To build the finite element models of hemipelvis and total hip joint by using multi - modality image registration technique with CT and MRI images. **Methods:**The CT and MRI images of a healthy female volunteer were collected in the same body position and were saved in DICOM format. A osseous three - dimensional model of ilium and femur was built by using Mimics 16.0 medical image software and Geomagic - Studio 11 reverse engineering software and it was based on CT data. Then the osseous three - dimensional model image and MRI images were matched and fused by using Solidworks software to rebuild the matched three - dimensional model of acetabular cartilage and femoral head cartilage. The attachment points of ligaments and muscles around the hip joint were marked on the model. The Data were imported into the Abaqus 6.14 software and a finite element model of hemipelvis and total hip joint was obtained. The stress distribution of unilateral hip joint in analogic standing position(1.6 times of bodyweight,800 N) was analyzed. **Results:**The three - dimensional finite element model of hemipelvis and total hip joint consists of 5 three - dimensional submodels,including ilium and proximal femoral cortical bones,cancellous bones,articular cartilages,ligaments and muscles,and involved 122 363 units and 216 149 nodes. The stress value and stress distribution of hip joint at the load of 800 N were similar to previous research results. **Conclusion:**The finite element model of hemipelvis and total hip joint built by using multi - modality image registration technique with CT and MRI images can correctly simulate the morphology of hip bone and cartilage,and it can literally reflect the hip mechanical properties of hip joint,so it has some values in scientific research and clinic.

Key words hip joint;finite element analysis;image registration

髋关节作为人体重要的负重关节,其力学传导机制异常是大部分髋部疾病产生和发展的原因之一^[1],

进行相关的生物力学研究有重大的临床及科研价值。1972 年 Brekelmans 等^[2]将有限元技术引入骨科领域,为骨科生物力学的研究开辟了新途径。建立一个解剖结构真实、形态准确的有限元模型是进行有限元分析的前提。由于人体组织形态不规则,常规计算机辅助设计软件无法准确实现实验目标的三维重建,而

基金项目:广东省省级科技计划项目(2013A032500009);国家重点学科广州中医药大学中医骨伤科学开放基金资助项目(YB06)

通讯作者:张庆文 E-mail:zh - qwen@163.com

髋关节结构、内容、层次复杂,单纯一种影像数据难以完整重建真实的髋部结构。本研究利用 CT、MRI 扫描获取髋关节 DICOM 格式数据,通过多模态图像配准技术对 2 种数据进行配准融合,建立了包含骨、软骨、韧带等结构形态完整的半骨盆全髋关节有限元模型,并进行了验证,现总结报告如下。

1 材料与设备

1.1 研究对象 健康女性志愿者 1 名,30 岁,体质量 55 kg,既往无髋部及全身系统性疾病病史。

1.2 实验设备 工作站(Windows 7 操作系统、Intel i7 CPU、GTX1080 4G 独立显卡、500 G 固态硬盘、32 G 内存),由广州中医药大学中医骨伤科学数字化重点实验室提供;东芝 Aquilion64 排螺旋 CT, Philips3.0T MRI;Mimics16.0 医学影像软件(Materialise),Geomagic-Studio11 逆向工程软件,Solidworks2014 三维设计软件、Abaqus6.14 有限元分析软件(Dassault Systemes)。

2 方法

2.1 采集影像数据 在被测试者平卧、双下肢持续

牵引状态下分别进行髋部 CT 和 MRI 扫描,扫描范围为髂嵴最高点上缘 1 cm 至小转子下 5 cm。CT 扫描层厚 0.5 mm、层距 5 mm;MRI 冠状位扫描层厚 5 mm、层距 5 mm,横切位扫描层厚 5 mm、层距 5 mm,矢状位扫描层厚 4 mm、层距 4 mm。CT 扫描获得 134 幅图像、MRI 扫描获得 72 幅图像,均以 DICOM 格式保存。

2.2 建立半骨盆全髋关节骨性结构三维模型 将 CT 扫描获得的 DICOM 数据导入到 Mimics16.0 软件,经阈值分割获得髌骨、股骨皮质骨大致轮廓[图 1(1)],然后通过区域增长、蒙皮编辑、腔隙填充等进行修补,生成皮质骨三维模型,经表面光滑处理后,导出为 stl 格式文件。再将导出的 stl 格式文件导入 Geomagic-Studio11 软件,经划分网格、拟合曲面处理后得到 stp 格式髌骨、股骨皮质骨模型。重复上述步骤得到髌骨、股骨松质骨模型[图 1(2)]。将所获得的 stp 格式数据导入 Solidworks2014 软件进行装配,建立半骨盆全髋关节骨性结构三维模型[图 1(3)]。

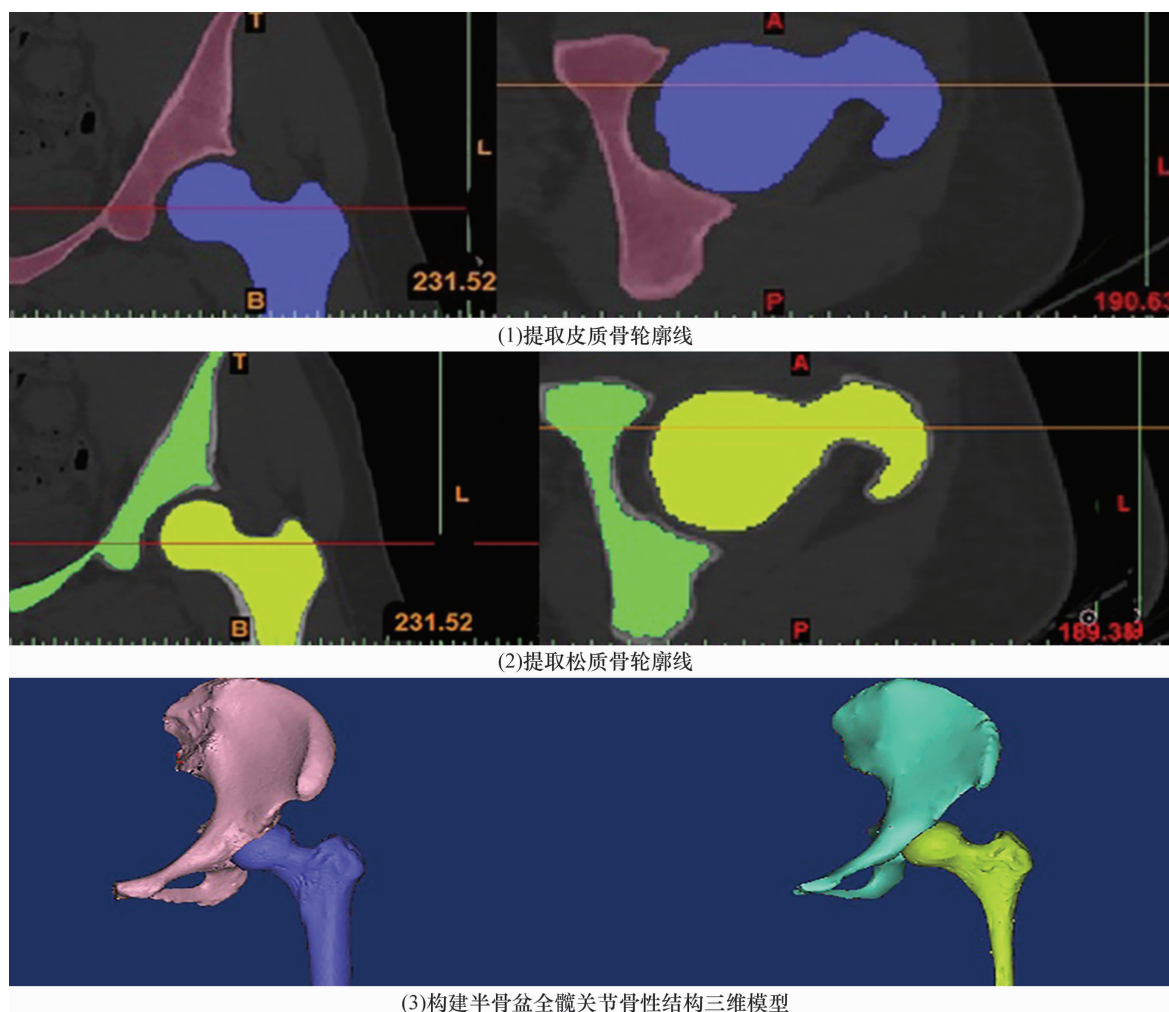


图 1 基于 CT 数据构建的半骨盆全髋关节骨性结构三维模型

2.3 建立半骨盆全髋关节软骨三维模型 提取半骨盆全髋关节骨性结构三维模型的矢状位、冠状位剖面视图,基于髋关节轮廓特征,使其在同一角度及平面下与 MRI 矢状位、冠状位图像配准;在 Solidworks 软件中

基于配准融合后的 MRI 图像定义骨性三维模型上的软骨轮廓及厚度,根据轮廓曲线构建三维曲面并通过放样功能对股骨头表面及髋臼表面区域进行放样处理,最终获得独立的股骨头软骨及髋臼软骨三维模型(图 2)。

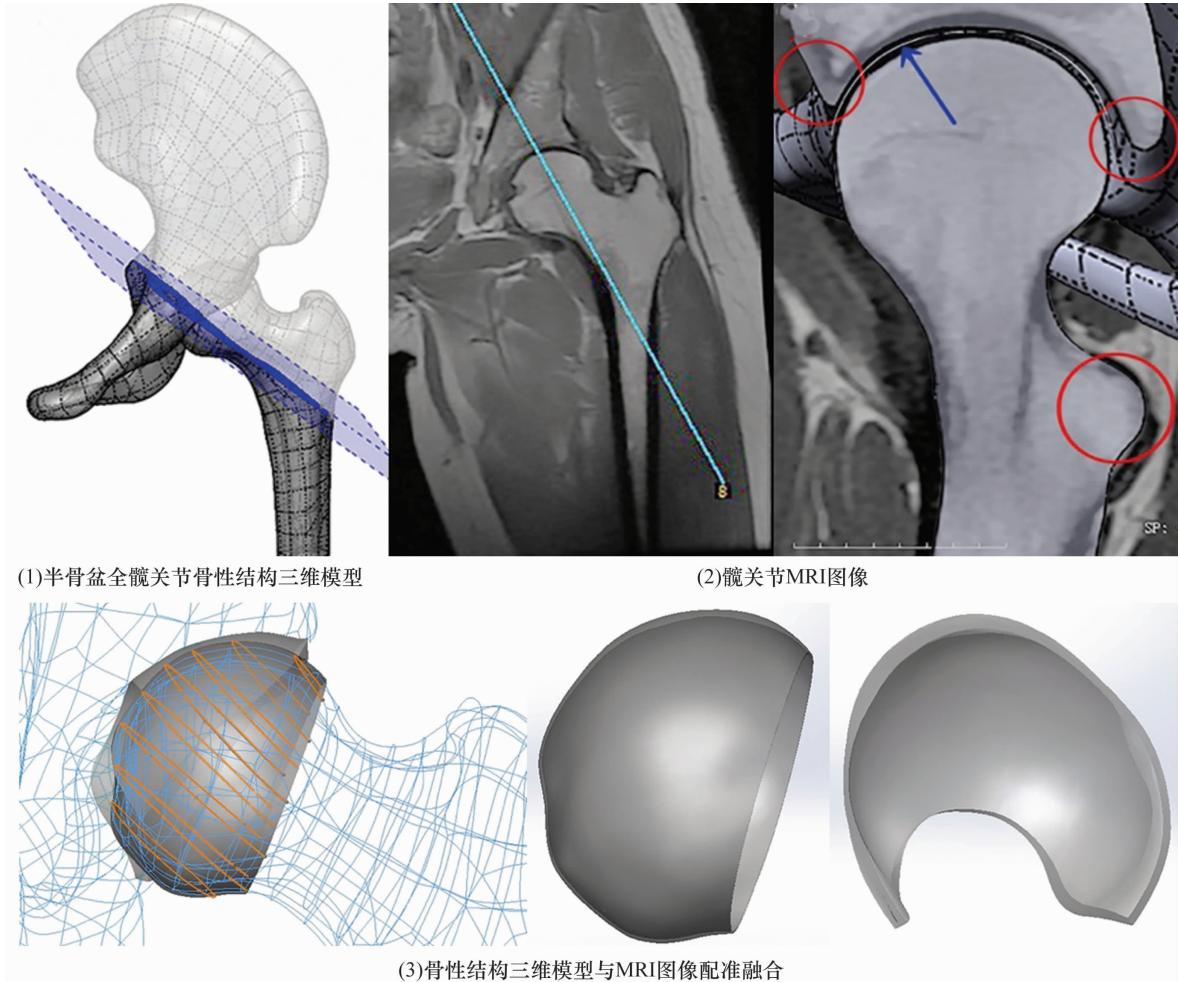


图 2 基于 CT 和 MRI 配准融合图像构建的半骨盆全髋关节软骨三维模型

2.4 定义肌肉韧带附着区 基于配准后的图像,在三维模型上标记髋关节周围韧带、肌肉的附着区(图 3)并计算区域大小,根据文献[3]中报道的方法估算韧带截面积。对韧带及肌肉采用简化建模的方式,以肌肉附着区为耦合面,创建线条特征并指派为轴向连接作用模拟肌肉力,以 Truss 桁架为模型属性并根据上述截面积指派相应截面模拟韧带结构。

2.5 建立有限元模型 将装配后的三维模型数据导入 Abaqus6.14 软件并进行网格划分,建立有限元网格模型。根据文献定义皮质骨、松质骨及软骨为各向同性且连续均匀的弹性材料,材料属性及赋值参考文献[4]的数据,详细数据见表 1。根据标记的解剖点以 TRESS 梁单元定义髋关节周围韧带。

2.6 验证有限元模型 模拟双腿站立位单侧髋关节受力的情况进行边界条件设定:约束半骨盆骶髂关节

表 1 髋关节有限元模型材料属性及赋值

材料属性	弹性模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	15 100	0.30
松质骨	4 457	0.22
软骨	10.5	0.45

和耻骨联合处的 6 个自由度,关节面采用无摩擦接触关系。按照 Sverdlova 等^[5]的方法将长收肌(560 N)、大收肌(600 N)、臀大肌(550 N)、臀中肌(700 N)、臀小肌(300 N)、梨状肌(500 N)、阔筋膜张肌(300 N) 7 条肌肉力以轴向连接作用力加载在附着点对应的耦合面上。基于 Brown 等^[6]的研究结果将关节作用力定为体重的 1.6 倍,即 800 N,加载于股骨远端的刚体上^[7],建立有限元分析模型(图 4),并进行分析验证。

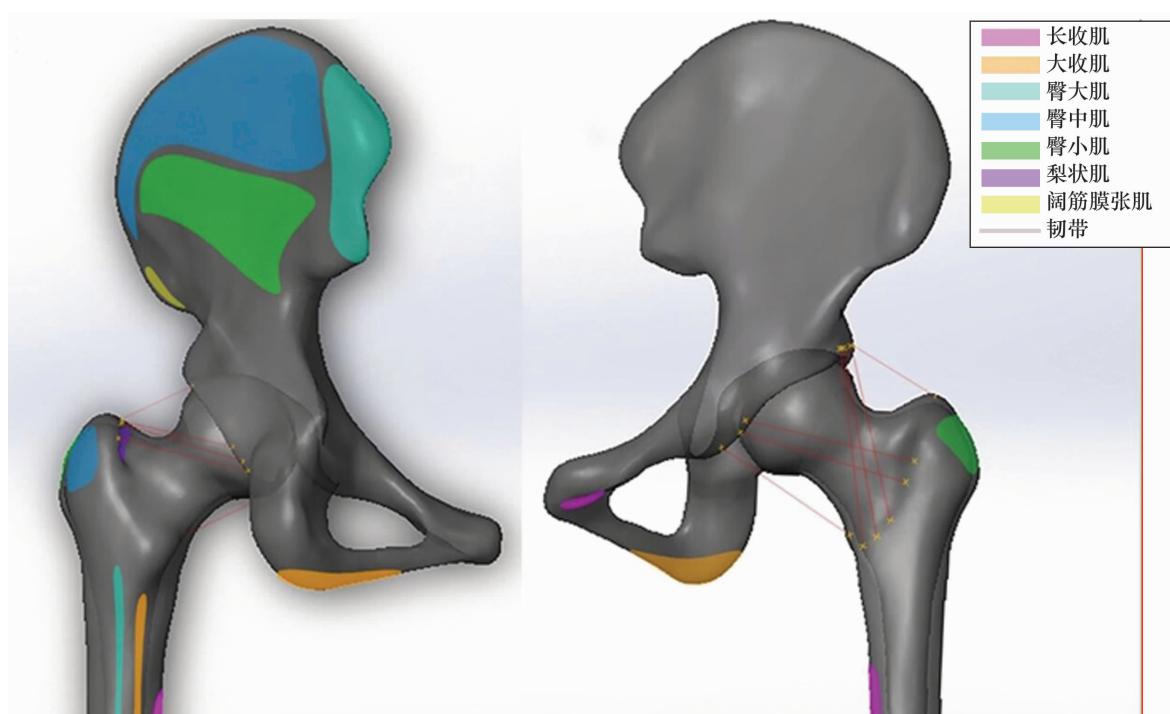


图3 标记肌肉、韧带附着区的三维模型

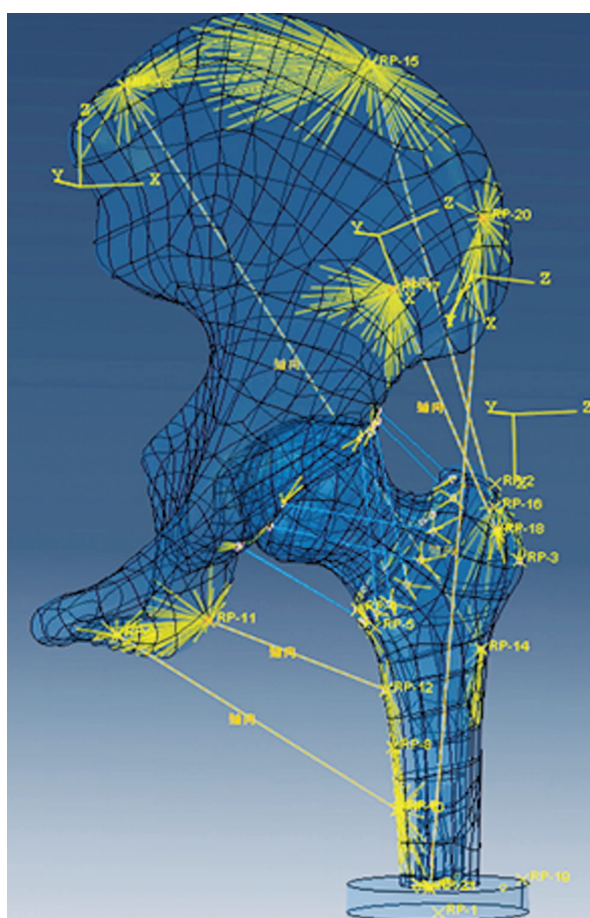


图4 包含肌肉、韧带条件的有限元分析模型

3 结果

建立的半骨盆全髋关节三维有限元模型,包含髌

骨和股骨近端的皮质骨、松质骨、关节软骨、韧带和肌肉共 5 部分三维子模型,涉及 122 363 个单元、216 149 个节点。在 800 N 载荷下,髋关节 MISES 应力分布情况与 Chen^[8]报道的站立位髋关节应力分布结果相近[图 5(1)、图 5(2)];股骨头软骨表面顶部及髌臼表面软骨穹顶部出现 CPRESS 应力峰值为 3.180 ~ 3.260 MPa [图 5(3)],最大接触应力值及最大接触应力位置与既往研究结果^[9-11]相近(表 2);股骨头颈内部出现明显应力集中带,其分布及方向特点与冠状位 CT 图像中压力骨小梁分布基本一致(图 6),并在股骨矩位置出现最大应力集中区。

4 讨论

有限元技术自 20 世纪 70 年代引入骨科研究领域以来,因其建模材料费用少、实验周期短及可重复利用等优点^[12-13],已在数字骨科研究中占有越来越重要的地位。人体组织形态不规则,单纯依靠逆向工程绘图软件无法准确描述骨骼的几何形态。随着计算机影像技术的发展,基于医学图像的建模方法成为主流^[14],特别是在有限元建模中引入 DICOM 数据^[15],大大提高了构图的精准性、减少了工作量。国内基于 CT 扫描下 DICOM 数据构建髋关节三维有限元模型早有报道^[16],该方法能够很好地重建骨的解剖形态,但髋关节结构内容层次复杂,特别是对于软骨及周围肌肉组织,因其在 CT 图像中灰度值低、分辨

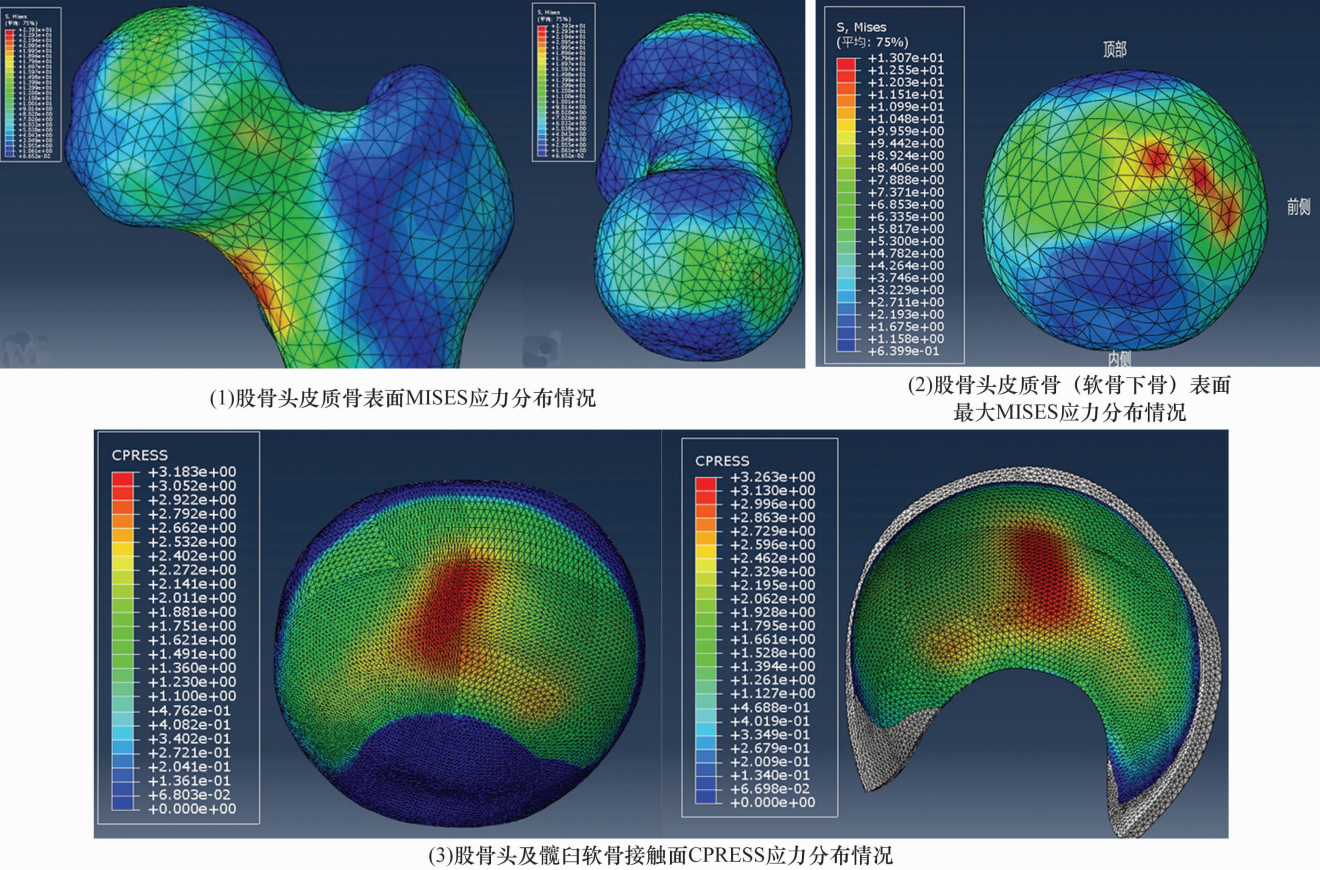


图 5 髋关节有限元模型应力分布情况

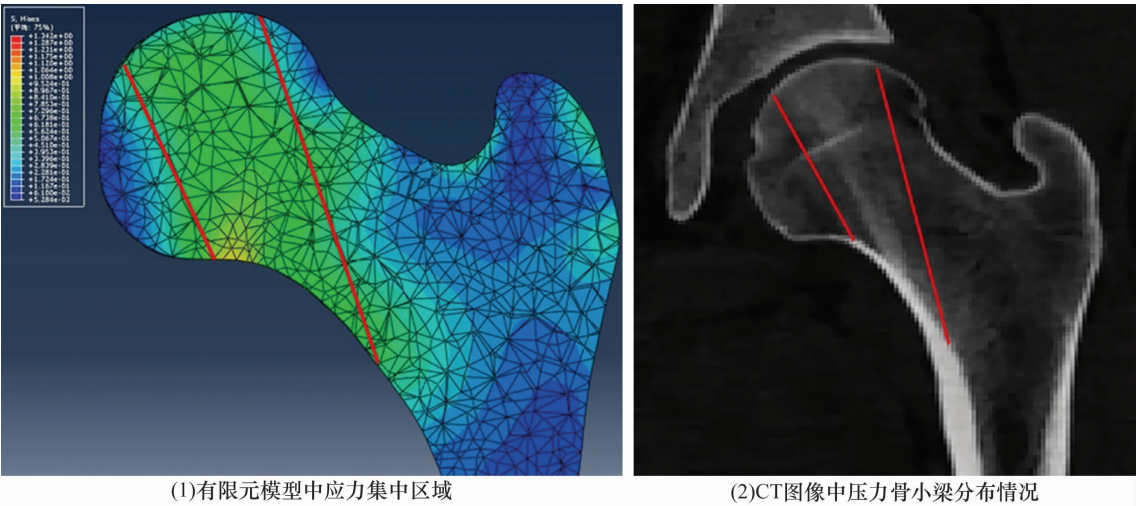


图 6 股骨头有限元模型中应力集中区与 CT 图像中股骨头压力骨小梁分布情况的对比

表 2 髋关节有限元模型最大接触应力分布情况与文献研究结果的对比

数据来源	髋关节最大接触应力 (MPa)	股骨头软骨最大接触应力位置	髋臼软骨最大接触应力位置
王沫楠 ^[9]	3. 551 ~ 3. 934	顶部	穹顶部
Ng ^[10]	3. 670	顶部	穹顶部
Jorge ^[11]	2. 300	顶部	软骨窝中心
本研究	3. 180 ~ 3. 260	顶部	穹顶部

率差,直接利用 CT 图像难以实现准确成像,如果采用 MRI 数据建模又会失去骨性结构的精准性,所以单纯一种影像数据难以完整重建真实的髋部结构。如果利用 CT、MRI 数据分别建模,后期装配中容易出现子模型间不匹配的问题,反而会影响有限元分析的真实性。医学图像配准融合技术最早应用于中枢神经系统疾病的诊治^[17],通过对不同图像的配准可以获得病灶区域更全面、细致的信息。随着医学图像技术的发展,越来越多种类的模态信息出现,综合信息处理可以减少成本、提高临床诊治效率^[18-19]。

本研究采用 CT、MRI 的 DICOM 格式数据,利用图像配准技术在 Solidworks 系统下通过寻找二者之间对应的几何变化参数实现了三维骨性模型与 MRI 影像的配准融合,提取 MRI 影像中的软骨轮廓及厚度信息,在三维系统中的骨性表面直接重建软骨模型,能够最大相似度重建髋部骨与软骨解剖情况,且能获得较好的子模型间匹配度。

本研究的结果表明,基于多模态图像配准技术利用 CT、MRI 图像建立的半骨盆全髋关节有限元模型能很好地模拟髋部骨骼、软骨的形态,并较为真实地反映髋关节的力学性能,具有一定的科研及临床价值。

5 参考文献

- [1] MADETI BK, CHALAMALASETTI SR, BOLLA PRAGADA S. Biomechanics of knee joint: A review[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2015, 10(2): 176-186.
- [2] BREKELMANS WA, POORT HW, SLOOFF TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts[J]. *Acta Orthop Scand*, 1972, 43(5): 301-317.
- [3] PIEROH P, SCHNEIDER S, LINGSLEBE U, et al. The Stress-strain data of the hip capsule ligaments are gender and side Independent suggesting a smaller contribution to passive stiffness[J]. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0163306.
- [4] GRECU D, PUCALEV I, NEGRU M, et al. Numerical simulations of the 3D virtual model of the human hip joint, using finite element method[J]. *Rom J Morphol Embryol*, 2010, 51(1): 151-155.
- [5] SVERDLOVA NS, WITZEL U. Principles of determination and verification of muscle forces in the human musculoskeletal system: Muscle forces to minimise bending stress[J]. *J Biomech*, 2010, 43(3): 387-396.
- [6] BROWN TD, PEDERSEN DR, BAKER KJ, et al. Mechanical Consequences of core drilling and bone-grafting on osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1993, 75(9): 1358-1367.
- [7] ZHOU GQ, PANG ZH, CHEN QQ, et al. Reconstruction of the biomechanical transfer path of femoral head necrosis: a subject-specific finite element investigation[J]. *Comput Biol Med*, 2014, 52: 96-101.
- [8] CHEN GX, YANG L, LI K, et al. A three-dimensional finite element model for biomechanical analysis of the hip[J]. *Cell Biochem Biophys*, 2013, 67(2): 803-808.
- [9] 王沐楠, 安贤俊. 髋关节表面接触应力数学模型的建立及验证[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(6): 2081-2089.
- [10] NG K, LAMONTAGNE M, LABROSSE MR. Hip joint stresses due to Cam-Type femoroacetabular impingement: a systematic review of finite element simulations[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0147813.
- [11] JORGE JP, SIMÕES FM, PIRES EB, et al. Finite element simulations of a hip joint with femoroacetabular impingement[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2014, 17(11): 1275-1284.
- [12] BONARETTI S, SEILER C, BOICHON C, et al. Image-based vs. mesh-based statistical appearance models of the human femur: implications for finite element simulations[J]. *Med Eng Phys*, 2014, 36(12): 1626-1635.
- [13] TAYLOR M, PRENDERGAST PJ. Four decades of finite element analysis of orthopaedic devices: where are we now and what are the opportunities? [J]. *J Biomech*, 2015, 48(5): 767-778.
- [14] KLING-PETERSEN T, RYDMARK M. Modeling and modification of medical 3D objects. The benefit of using a haptic modeling tool[J]. *Stud Health Technol Inform*, 2000, 70: 162-167.
- [15] ESCOTT EJ, RUBINSTEIN D. Free DICOM image viewing and processing software for your desktop computer: what's available and what it can do for you[J]. *Radiographics*, 2003, 23(5): 1341-1357.
- [16] 傅栋, 靳安民. 应用 CT 断层图像快速构建人体骨骼有限元几何模型的方法[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2007, 11(9): 1620-1623.
- [17] 张俊杰, 周涛, 陆惠玲, 等. 特征级多模态医学图像融合技术的研究与进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2016, 33(2): 394-399.
- [18] SHEKHAR R. MO-DE-202-04: Multimodality Image-Guided Surgery and Intervention: For the Rest of Us [J]. *Med Phys*, 2016, 43(6): 3699-3700.
- [19] CHRISTENSEN G. WE-H-202-04: advanced medical image registration techniques[J]. *Med Phys*, 2016, 43(6): 3845-3845.