

## 基于CT图像重建人体膝关节3D骨骼优化模型

牛军龙,秦现生,洪杰,王文杰,李勇政  
西北工业大学机电学院,陕西 西安 710072

**【摘要】目的:**重建一个含有股骨远端和胫骨近端的人体膝关节3D骨骼优化模型。**方法:**采用螺旋CT机扫描人体膝关节部位,从胫骨近端到股骨远端,获得DICOM格式图像数据。利用Mimics软件进行图像数据输入和视图图像处理重建3D骨骼模型,并使用它自带的3-matic软件对所建的3D模型进行优化处理。**结果:**使用Mimics软件重建了一个含有股骨远端和胫骨近端的左侧人体膝关节3D骨骼模型,其自带的3-matic软件重建了一个含有股骨远端和胫骨近端的左侧人体膝关节3D骨骼优化模型。**结论:**该优化模型可清晰精确地模拟股骨远端和胫骨近端的三维几何形态,能导入到ANSYS/ABAQUS等有限元软件进行力学特性分析,也能结合MRI重建含有半月板的人体膝关节生物力学模型,为仿生膝关节的结构设计提供理论依据。

**【关键词】**CT图像;人体膝关节;模型重建;Mimics软件;3-matic软件;股骨远端;胫骨近端;3D骨骼优化模型

**【中图分类号】**R314;TP391

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)07-0700-04

## Reconstruction of three-dimensional skeleton optimization model of human knee joint based on CT images

NIU Jun-long, QIN Xian-sheng, HONG Jie, WANG Wen-jie, LI Yong-zheng  
School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

**Abstract: Objective** To reconstruct a three-dimensional (3D) skeleton optimization model of human knee joint containing distal femur and proximal tibia. **Methods** Spiral CT machine was used to scan human knee joint from proximal tibia to distal femur to obtain images data in DICOM format. The images data were imported and view images were processed by using Mimics software to reconstruct 3D skeleton model. And the reconstructed 3D model was optimized by 3-matic software of Mimics software. **Results** A 3D skeleton model of left human knee joint containing distal femur and proximal tibia was reconstructed by using Mimics software, and a 3D skeleton optimization model of left human knee joint containing distal femur and proximal tibia was reconstructed by using 3-matic software of Mimics software. **Conclusion** The optimization model clearly and precisely simulates the 3D geometrical morphology of distal femur and proximal tibia. The simulated 3D geometrical morphology can be imported into ANSYS/ABAQUS finite element software to analyze mechanical properties, and be combined with MRI to reconstruct the biomechanical model of human knee joint containing meniscus, providing theoretical basis for the structural design of bionic knee joint.

**Key words:** CT image; human knee joint; model reconstruction; Mimics software; 3-matic software; distal femur; proximal tibia; three-dimensional skeleton optimization model

### 前言

生物关节具有结构紧凑、摩擦小、优异的抗冲击振动及运动学和动力学等特性。近年来,随着机器人的广泛应用和发展,人们对机器人关节的研究不

再仅限于传统的机械关节结构,开始向生物关节结构和运动模式等方面展开探索,进行仿生关节的设计和研究<sup>[1-3]</sup>。人体膝关节由股骨、胫骨和半月板等构成,拥有独特的股胫骨滚滑动相结合的运动模式,主要承受自身体重的压力和来自地面的冲击力,是人体最大且构造最复杂的滑膜关节。为了揭示人体膝关节的运动学和动力学特性等,国内外学者提出了许多的生物力学模型,不过相比之下动力模型比较接近真实的人体膝关节。考虑到人体膝关节各结构处的受力情况,如关节接触力、韧带张力以及外部

**【收稿日期】**2016-01-18

**【基金项目】**国家自然科学基金(51275413)

**【作者简介】**牛军龙(1986-),男,博士,主要研究方向:机器人仿生关节,E-mail: longlong611@126.com

载荷的影响,Moeinzadeh等<sup>[4]</sup>假定股骨固定且胫骨相对股骨运动,建立了一个二维矢状面内的人体膝关节运动学和动力模型。之后,Abdel-Rahman和Hefzy<sup>[5]</sup>对Moeinzadeh等所建的动力模型进行了改进,从中可以发现股骨和胫骨接触关节面的几何轮廓对人体膝关节的运动有一定的影响。为了更好地描述人体膝关节的运动,国内学者王西十等<sup>[6-7]</sup>进一步建立了股骨也可动的自由运动人体膝关节动力模型。考虑到较多模型中的股胫关节都是刚性接触,Machado等<sup>[8]</sup>建立了一个弹性接触的人体膝关节二维动力模型。然而,真正的人体膝关节是三维的,因此,Abdel-Rahman和Hefzy<sup>[9]</sup>提出并建立了一个人体膝关节三维动力模型。总之,对于不管是建立人体膝关节的三维动力模型还是二维动力模型,其中获得精确的股骨和胫骨接触关节面几何形状是至关重要的。上述人体膝关节动力模型虽以人体膝关节解剖学为依据,却是经过简化和假设等条件后才建立的,并且大多数都是二维模型。

随着计算机断层扫描(CT)和核磁共振成像(MRI)技术的出现和发展,人体膝关节生物力学模型中的几何数据可以从MRI和CT中获得<sup>[10]</sup>,同时结合Materialise公司的交互式医学影像控制系统(Mimics)软件,可以实现对人体膝关节结构的三维模型重建<sup>[11-12]</sup>。其中,CT对骨组织的分辨率优于MRI,MRI对软组织的分辨率较好<sup>[13-14]</sup>。本文采用螺旋CT对一个健康的活体膝关节在横断面内从胫骨近端到股骨远端进行扫描,以此来获取DICOM格式的影像数据。将图像数据输入到Mimics软件中生成三视图,以左侧人体膝关节为例,通过Thresholding、Edit Masks、Region Growing和Calculate 3D等功能重

建含有股骨远端和胫骨近端的人体膝关节3D骨骼模型。利用其自带的3-matic软件中的Smooth、Reduce、Auto Remesh、Quality Preserving Reduce Triangles、Mark Intersecting Triangles、Create Volume Mesh和Analyze Mesh Quality功能对此模型进行优化处理,最终得到了一个重建的左侧人体膝关节3D骨骼优化模型。

## 1 图像数据采集

选取一名成年男性,膝关节正常、健康以及无膝关节外伤病史的志愿者,在西安某医院采用美国GE Lightspeed VCT 64排128层螺旋CT机对其膝关节部位进行扫描。扫描时志愿者仰卧于检查床上,扫描电压120 kV,扫描电流120 mA,横断面扫描,扫描范围从胫骨近端至股骨远端。扫描图像层厚1.25 mm,512×512像素,共获得断层图像序列128张。图片以DICOM格式存储于计算机中。

## 2 3D骨骼模型重建

### 2.1 图像数据输入

运行Mimics 16.0软件,从菜单栏里的“File”选择“New project wizard”进行相应操作,输入前面通过图像数据采集所获取的以DICOM格式存储的128张CT图片。成功输入这些图片后,Mimics软件会自动识别横断面影像数据生成横断面视图,同时经过计算一并生成冠状面视图和矢状面视图。图1所示为Mimics软件生成的三视图。其中左侧上面是冠状面视图,左侧下面是矢状面视图,右侧上面是横断面视图,而右侧下面是由三视图所构成的一个整体的三维视图。

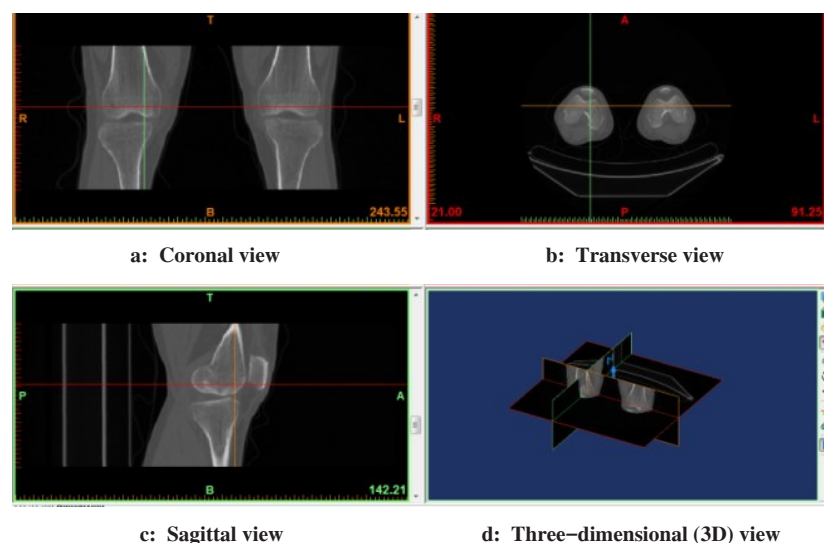


图1 Mimics软件生成的三视图

Fig.1 Three views generated by Mimics software

## 2.2 视图图像处理

**2.2.1 灰度阈值设定** CT图片导入到Mimics 16.0软件中生成的视图图像为灰度图像。由于人体膝关节各组织密度不同,所以对应的灰度值也不同,可利用软件中的二值化(Thresholding)功能设定图像的灰度阈值范围来获取相应组织。对于骨骼组织,软件默认的灰度阈值范围为226~2238,根据刘子越等<sup>[15]</sup>研究发现效果不好,可仅供参考。本文通过手动设定灰度阈值范围为128~2238,进而提取出人体膝关节骨骼组织的图像,生成一个掩膜(Mask)。

**2.2.2 图像编辑** 螺旋CT机在扫描人体膝关节过程中受到外界噪声的干扰等,会造成获取的骨骼组织图像不完整,选择需要的骨骼组织,可利用Edit Masks功能对3个视图里的图像进行“添加”或“擦除”操作,进一步建立更加完整准确的骨骼组织图像。

**2.2.3 区域增长** 利用Region Growing功能选取已经进行图像编辑过的骨骼组织,实现图像分割,生成该骨骼组织的一个掩膜(Mask)。

**2.2.4 计算三维** 选取该骨骼组织的一个掩膜(Mask),可利用Calculate 3D功能对该骨骼组织进行模型重建,获得其精确的三维几何形态模型。以左侧人体膝关节为例,按上述视图图像处理的步骤,分别重建股骨远端和胫骨近端的3D骨骼模型,最终获得一个含有股骨远端和胫骨近端的左侧人体膝关节3D骨骼模型。图2所示为左侧人体膝关节3D骨骼模型。

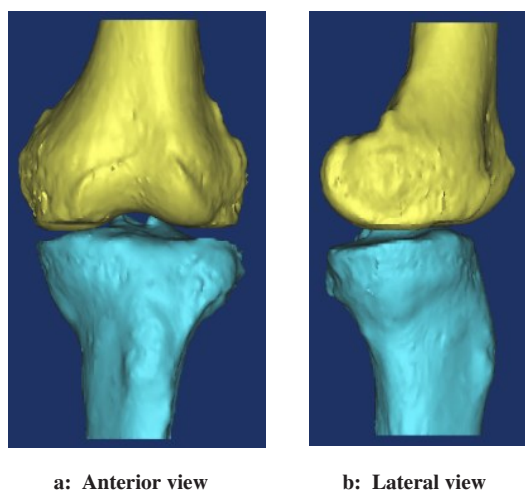


图2 左侧人体膝关节3D骨骼模型  
Fig.2 3D skeleton model of the left human knee joint

## 3 3D骨骼模型优化

初步重建的左侧人体膝关节3D骨骼模型,是由三角片组成的面网格模型。利用Mimics 16.0软件自

带的3-matic 8.0软件打开重建的左股骨远端3D骨骼模型,可以得到优化前左股骨远端3D网格模型。图3所示为优化前左股骨远端3D网格模型。

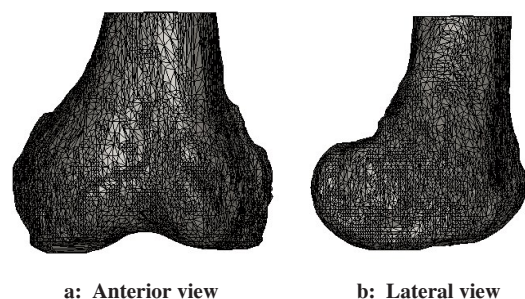


图3 优化前左股骨远端3D网格模型  
Fig.3 3D grid model of left distal femur before optimization

该3D网格模型上三角形大小不一样、数量多且有时存在交叉和重叠的问题。由图2可知,左侧人体膝关节的股骨远端和胫骨近端3D骨骼模型表面比较粗糙,有突起和尖刺等特征。针对存在的这些问题,可利用3-matic 8.0软件中的Smooth、Reduce、Auto Remesh、Quality Preserving Reduce Triangles、Mark Intersecting Triangles、Create Volume Mesh和Analyze Mesh Quality功能,按照次序分别对重建的左股骨远端和胫骨近端的3D骨骼模型进行优化处理。图4为优化后左股骨远端3D网格模型,图5为优化后左侧人体膝关节3D骨骼模型。

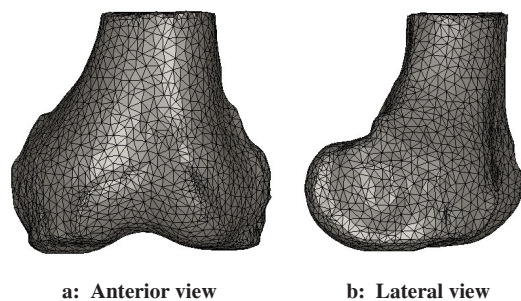
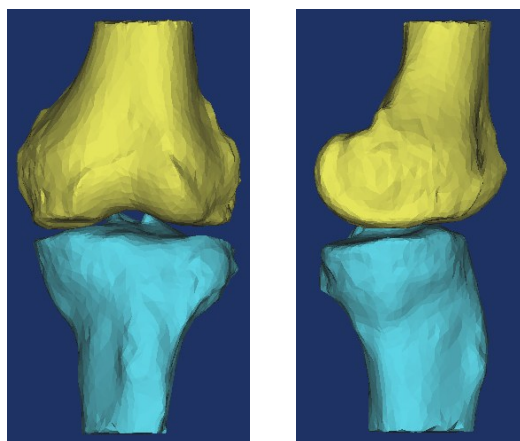


图4 优化后左股骨远端3D网格模型  
Fig.4 3D grid model of left distal femur after optimization

## 4 结语

采用螺旋CT机对人体膝关节部位扫描获得DICOM格式的图像数据,将其数据输入到Mimics16.0软件中生成三视图,并对其图像进行处理,重建了一个含有股骨远端和胫骨近端的左侧人体膝关节3D骨骼模型。该模型表面比较粗糙,有突起和尖刺等特征,且它实际上是由三角片组成的面网格模型,三角形大小不一、数量多以及有时存在交叉和重叠的问题等。





a: Anterior view

b: Lateral view

图5 优化后左侧人体膝关节3D骨骼模型

Fig.5 3D skeleton model of left human knee joint after optimization

利用Mimics16.0软件自带的3-matic 8.0软件对初步重建模型进行了进一步的优化处理,获得了一个含有股骨远端和胫骨近端的左侧人体膝关节3D骨骼优化模型。优化后的3D网格模型从之前的面网格转变为体网格,表面变得较为光滑,减少了三角片的数量,提高了三角片的质量以及去除了交叉和重叠的三角片等。

重建的左侧人体膝关节3D骨骼优化模型,清晰地模拟了股骨远端和胫骨近端的三维几何形态,能为下一步导入到ANSYS/ABAQUS等有限元软件,在外载荷作用下进行股、胫骨接触面力学特性分析奠定基础。同时也能结合MRI,为以后建立含有半月板的人体膝关节生物力学模型及分析半月板在受外载荷作用下的应力分布等静力学特性做好准备工作。

以上研究为仿生膝关节的结构设计及以后建立仿生膝关节结构与冲击载荷间的关系提供了理论依据。

## 【参考文献】

- [1] 应申舜,秦现生,任振国,等. 基于人工肌肉的机器人驱动关节设计与研究[J]. 机器人, 2008, 30(2): 142-146.  
YING S S, QIN X S, REN Z G, et al. Design and research of robot driving joint based on artificial muscles [J]. Robot, 2008, 30(2): 142-146.
- [2] 应申舜,秦现生,任振国,等. 仿生关节驱动器动力学分析[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(11): 1501-1506.  
YING S S, QIN X S, REN Z G, et al. Bio-mimetic joint actuator imitating the function of human knee [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(11): 1501-1506.
- [3] 陈兵,骆敏舟,孙少明,等. 基于仿生原理的节能减振类人机器人

- 膝关节的设计[J]. 机器人, 2014, 36(2): 218-223.
- CHEN B, LUO M Z, SUN S M, et al. Design of energy-saving and vibration damping knee joint of humanoid robot based on bionic principles [J]. Robot, 2014, 36(2): 218-223.
- [4] MOEINZADEH M H, ENGIN A E, AKKAS N. Two-dimensional dynamic modelling of human knee joint [J]. J Biomech, 1983, 16 (4): 253-264.
- [5] ABDEL-RAHMAN E, HEFZY M S. A two-dimensional dynamic anatomical model of the human knee joint [J]. J Biomech Eng, 1993, 115(4A): 357-365.
- [6] 王西十,白瑞蒲,AKKAS N,等. 人膝关节矢状面内啮合运动的数学模型[J]. 医用生物力学, 1997, 12(1): 30-34.  
WANG X S, BAI R P, AKKAS N, et al. On moving constraint conditions of the human knee joint [J]. Journal of Medical Biomechanics, 1997, 12(1): 30-34.
- [7] 王西十,白瑞蒲,TUMER S T,等. 一个解剖基于人体下肢的生物动力模型——第一部分: 模型描述[J]. 力学与实践, 2000, 22(1): 40-44.  
WANG X S, BAI R P, TUMER S T, et al. An anatomically-based biodynamic model of the human lower extremity-part I: descriptions of model [J]. Mechanics in Engineering, 2000, 22(1): 40-44.
- [8] MACHADO M, FLORES P, CLARO J C, et al. Development of a planar multibody model of the human knee joint [J]. Nonlinear Dyn, 2010, 60(3): 459-478.
- [9] ABDEL-RAHMAN E M, HEFZY M S. Three-dimensional dynamic behaviour of the human knee joint under impact loading [J]. Med Eng Phys, 1998, 20(4): 276-290.
- [10] MADETI B K, CHALAMALASETTI S R. Biomechanics of knee joint-A review [J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2015, 10(2): 176-186.
- [11] 何叶松,李莉,单晶心,等. 立体三维膝关节模型的创建[J]. 中国医科大学学报, 2008, 37(5): 617-619.  
HE Y S, LI L, SHAN J X, et al. Establishment of the stereoscopic three-dimensional knee joint model [J]. Journal of China Medical University, 2008, 37(5): 617-619.
- [12] 王大忠,余正红,周民强,等. 3D膝关节模型的构建[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 14(48): 8945-8949.  
WANG D Z, YU Z H, ZHOU M Q, et al. Three-dimensional knee joint model reconstruction [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 14(48): 8945-8949.
- [13] 王建平,韩雪莲,季文婷,等. 人体膝股关节相对运动的三维图像配准分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2009, 26(6): 1340-1344.  
WANG J P, HAN X L, JI W T, et al. Analysis of human tibio-femoral joint relative kinematics based on 3D image registration [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2009, 26(6): 1340-1344.
- [14] 王建平,钱理为,王成焘. 人体膝关节几何解剖模型仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 2806-2809.  
WANG J P, QIAN L W, WANG C T. Simulation of geometric anatomy model of human knee joint [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 2806-2809.
- [15] 刘子越,王辅忠. 人体膝关节三维有限元模型的建立[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2014, 22(11): 4-5.  
LIU Z Y, WANG F Z. The establishment of three-dimension model of human knee joint [J]. Chinese Journal of Traditional Medical Traumatology and Orthopedics, 2014, 22(11): 4-5.

(编辑:黄开颜)