

基于CT影像的人体踝关节三维重建

孙旭阳, 石更强

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093

【摘要】以踝关节的生理解剖结构为理论依据,利用踝关节的CT图像作为二维数据源,通过医学图像处理软件Mimics建立踝关节的三维模型,然后使用3-matic对三维模型的网格进行优化,最后对优化前后的模型进行对比分析。结果发现经过优化后的踝关节三维模型在结构上与人体真实的踝关节结构并无明显的差异,精确程度满足要求,对于患者病情的分析及治疗方案的确立具有重要的指导意义。

【关键词】CT影像;踝关节;医学图像处理;三维重建

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)07-0850-06

Three-dimensional reconstruction of the ankle joint based on CT image

SUN Xuyang, SHI Gengqiang

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

Abstract: Based on the physiological and anatomical structures of the ankle joint, the CT image of the ankle joint is used as the two-dimensional data source to establish the three-dimensional (3D) model of the ankle joint by medical image processing software Mimics, and the mesh of the 3D model is optimized by 3-matic. Finally, the models before and after optimization are compared and analyzed. The results reveal that the optimized 3D model of the ankle joints has no obvious difference from the real ankle structure, and its accuracy meets the requirements, which has great significance in the analysis of patients' condition and the establishment of treatment plan.

Keywords: CT image; ankle joint; medical image processing; three-dimensional reconstruction; optimization; precision

前言

踝关节具有很强的平衡人体的作用,在进行步行、奔跑、跨越等动作时,踝关节可以使人体保持一种相对稳定的状态。踝关节由腓骨远端、胫骨远端以及距骨这3部分组成,又被称为距骨小腿关节^[1]。在日常生活中,剧烈跑动引发的扭伤和撞击很容易造成踝关节损伤,而车祸以及高空坠落也是造成踝关节损伤的多发性原因^[2]。踝关节损伤患者在医院接受治疗过程中,都会进行电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT),医生通过断层扫描数据对患者病情进行初步诊断,但所得到的CT图像都是二维图像,不能直观地对患者具体受伤情况进行分析。有研究利用断层扫描得到的一系列二维数

据,重建成为三维实体模型,以便于临床医生精确地了解患者的受伤情况,从而制定更详细的治疗方案^[3]。

利用CT数据对人体踝关节进行三维重建,可以直观地看到踝关节外形,了解患者受伤情况,这对于医疗诊断具有重要意义^[4]。若三维重建得到的模型与患者本身的关节相比误差较大,则无法对患者的病情进行精确分析,更无法确立相应的治疗方案。本研究通过Mimics软件对螺旋CT数据进行预处理,提取踝关节部分进行三维重建,之后导入3-matic中,对初步建立的三维模型进行网格优化,最后生成踝关节的三维体网格模型。

1 三维重建软件概况

现在常用的医学CT数据三维重建软件主要有Mimics、3D-DOCTOR、Simpleware、MITK、Amira、3DMED等,其中,Mimics软件使用最为广泛^[5]。Mimics软件在使用上相对于其他三维重建软件较为简单,操作也很方便^[6]。Mimics软件与3-matic软件是关联的,在Mimics操作界面完成三维图像的初步

【收稿日期】2022-01-20

【基金项目】国家自然科学基金(51475308)

【作者简介】孙旭阳,硕士研究生,研究方向:三维重建与力学分析,E-mail: 15800929326@163.com

【通信作者】石更强,研究生导师,研究方向:仿生结构设计及功能研究,E-mail: gengersgq@163.com

建模后可以通过 Remesh 模块跳转到 3-matic 中对三维模型进行网格优化及体网格划分,最后将网格数据导回 Mimics 中,并可以对该三维模型进行材质赋予,这样就不需要使用逆向工程软件去生成三维实体模型,后续对于三维模型进行有限元分析时也可以直接导入材料属性^[7]。

2 研究对象和数据采集

在上海市杨浦区市东医院选择一名男性志愿者,年龄 34 岁,无右踝关节病史,进行踝关节 CT 检查,无明显骨骼发育畸形,骨质无明显退变等,排除踝关节异常^[8]。志愿者成仰卧姿势,螺旋 CT 扫描踝关节的中立位,扫描图像层厚为 0.6 mm,图像为 512×512 像素,共获得 346 张冠状面、矢状面和横截面的断层图像序列,最后将断层扫描数据以 DICOM 格式导出并保存^[9]。

3 踝关节骨性结构建模过程

3.1 CT 图像的导入

将存储为 DICOM 格式的 CT 数据导入 Mimics 21.0(图 1),共导入 346 张 CT 图像。导入 CT 图像后的 Mimics 21.0 软件工作界面如图 2 所示^[10]。

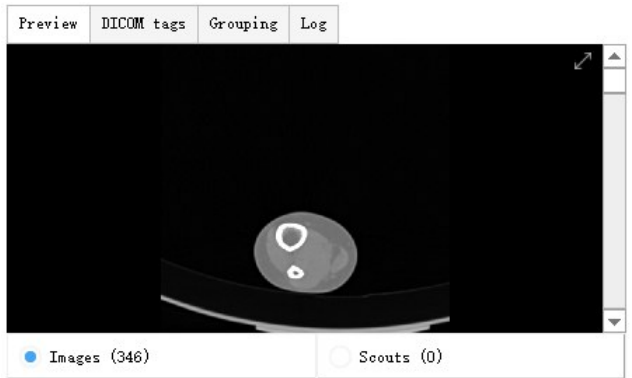


图1 CT 图像数据的导入
Figure 1 Import of CT image data

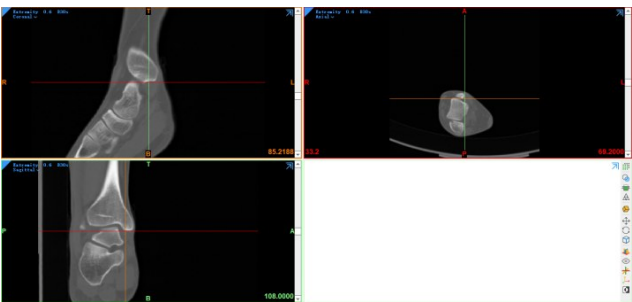
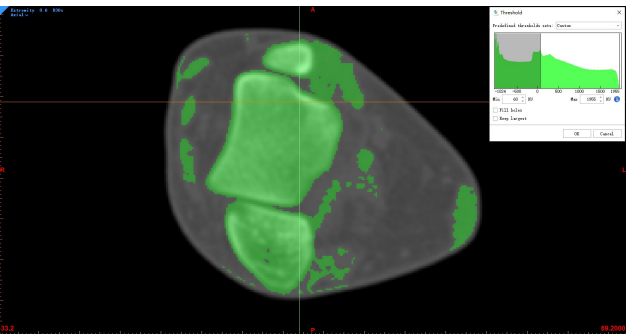


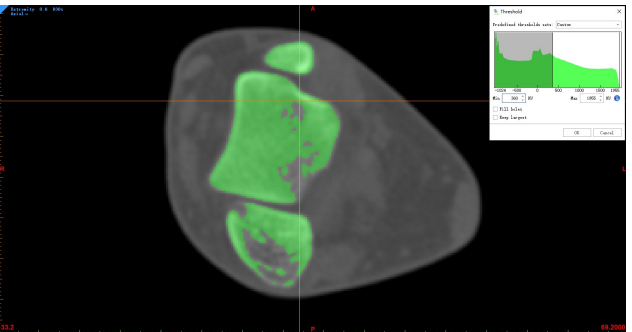
图2 工作界面
Figure 2 Work interface

3.2 阈值分割

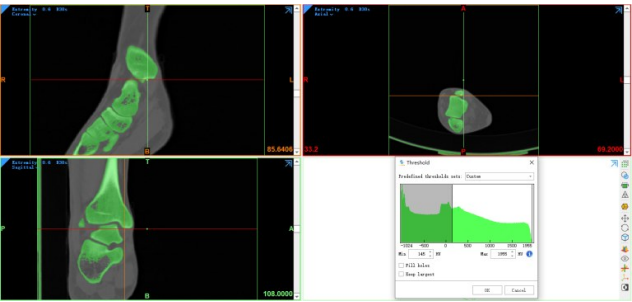
在 Mimics 软件导航栏选择 SEGMENT 模块,点击 New Mask, Predefined thresholds sets 选择 Bone (CT),显示骨的默认阈值为 226~1 955 HU,为了三维建模的精确性,需要手动调节阈值的范围。在提取骨组织时,若阈值的最小值设置过高,则会丢失一部分骨组织图像;若阈值的最小值设置太低,则会有很多噪音被连带提取^[11]。选择冠状面视图,调节阈值范围最小值,并观察图像的变化情况。当阈值的最小值设定为 60 HU 时,有很多非骨组织被连带提取(图 3a);当阈值的最小值设定为 360 HU 时,有部分骨组织图像并没有被提取出来(图 3b)。本研究在提取踝关节的骨组织时,边观察图像边调节阈值的最小值,观察到有非骨组织图像即将出现时停止,调节阈值的最终大小为 145~1 955 HU(图 3c)^[12]。



a: 阈值最小值 60 HU



b: 阈值最小值 360 HU



c: 阈值设定为 145~1955 HU

图3 阈值设定

Figure 3 Threshold setting

3.3 单层编辑

采用蒙版编辑工具(Edit Mask)填充胫骨、腓骨和距骨内部的孔洞,删除胫骨、腓骨和距骨外部多余的像素点。为了建模的准确度及平滑度,采用单层编辑。先选择冠状面视图,从上到下在每一层图像上对所需骨组织进行手动填充与删除,完成后再通过矢状面和横断面的视图对踝关节模型进行补充编辑,保证填充完成后,矢状面、冠状面和横断面视图

中均没有孔洞存在,为后续对三维模型进行网格划分奠定基础^[13]。如果图像中仍有部分孔洞未被填充完全,那么在计算生成踝关节三维模型时,模型内部会生成一些小的曲面;进行网格划分时,这些小的曲面会使模型产生很多质量较差的网格,影响踝关节三维模型的精确程度,甚至会导致体网格划分失败^[14]。孔洞填充前后图层对比见图4。



a: 孔洞填充前

b: 孔洞填充后

图4 孔洞填充前后图层对比

Figure 4 Layer comparison before and after hole filling

3.4 区域增长

将CT图像所有层面全部填充完毕后,使用区域增长命令(Region Grow),分别选取胫骨、腓骨及距骨部分,将其从图像中提取出来,并以不同颜色标记,胫骨标记为黄色、腓骨标记为紫色、距骨标记为蓝色(图5)。

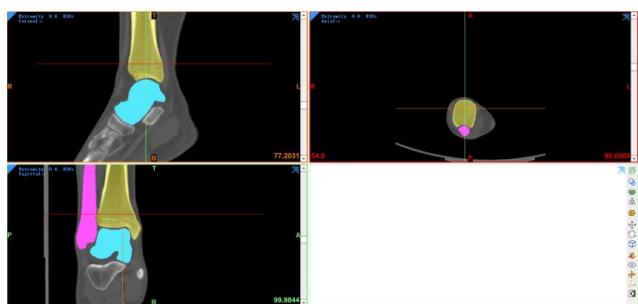


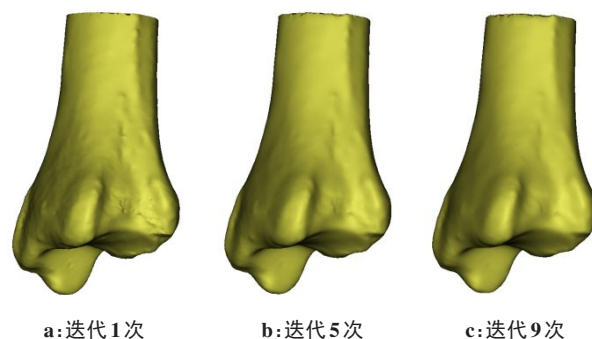
图5 蒙板标记

Figure 5 Tag mask

3.5 生成三维模型

选择想要生成三维模型的蒙板,将指定颜色像素部分计算生成三维仿真模型。以胫骨为例,右键选择黄色蒙板,点击 Calculate Part, Quality 选择 Optimal, 计算生成胫骨三维仿真模型。计算生成的胫骨三维仿真模型较为粗糙,需要对其进行光滑处理^[15]。设置平滑系数为0.4,迭代次数分别为1、5、9次后获得的模型如图6所示。可以看出,迭代1次的模型光滑度没有达到预期要求;迭代9次的模型虽然很光滑,但已经失真;而

迭代5次得到的模型符合光滑需求并保留了模型。因此最终设置平滑系数为0.4,迭代次数设为5次,完成后得到光滑的胫骨三维模型。



a: 迭代1次

b: 迭代5次

c: 迭代9次

图6 不同光滑参数设置的比较

Figure 6 Comparison among different smoothing parameter settings

重复上述步骤,分别建立腓骨和距骨的三维模型,并对其进行光滑处理,最终计算生成的踝关节三维模型如图7所示^[16]。

3.6 踝关节三维模型的优化

将进行光滑处理后的踝关节三维模型通过 FEA 有限元前处理模块导入 3-matic 软件中,未经网格优化的踝关节三维模型网格不规则且排列杂乱,明显不符合要求,需要对其进行相应的优化处理,从而得到更精确的体网格模型^[17]。

以胫骨为例,选择胫骨模型,在 Remesh 模块下点

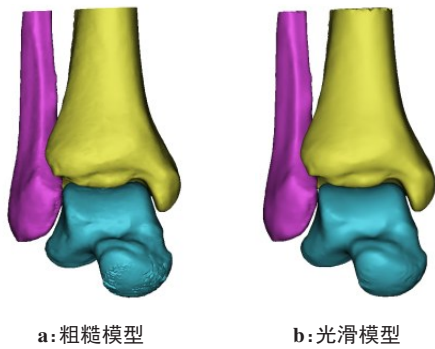


图7 踝关节三维模型
Figure 7 Three-dimensional model of the ankle joint

击 Inspection Page,对胫骨模型进行三角面片的质量检查,Shape measure 选择 Height/Base (A),设置 Minimum/Maximum为0.3,低于0.3的三角面片即为质量不合格的三角面片。分别查看胫骨、腓骨和距骨的网格属性:未经处理前,胫骨、腓骨、距骨质量合格的三角面片数量为18 806(93%)块、11 792(94%)块、20 751(98%)块,如图8所示。



图8 胫骨、腓骨和距骨的网格属性
Figure 8 Mesh properties of the tibia, fibula and talus

首先对三维模型进行自适应网格划分,精简网格数量。初步优化后,胫骨、腓骨、距骨质量不合格的三角面片数量为110(1%)块、71(1%)块、71(1%)块,如图9所示。

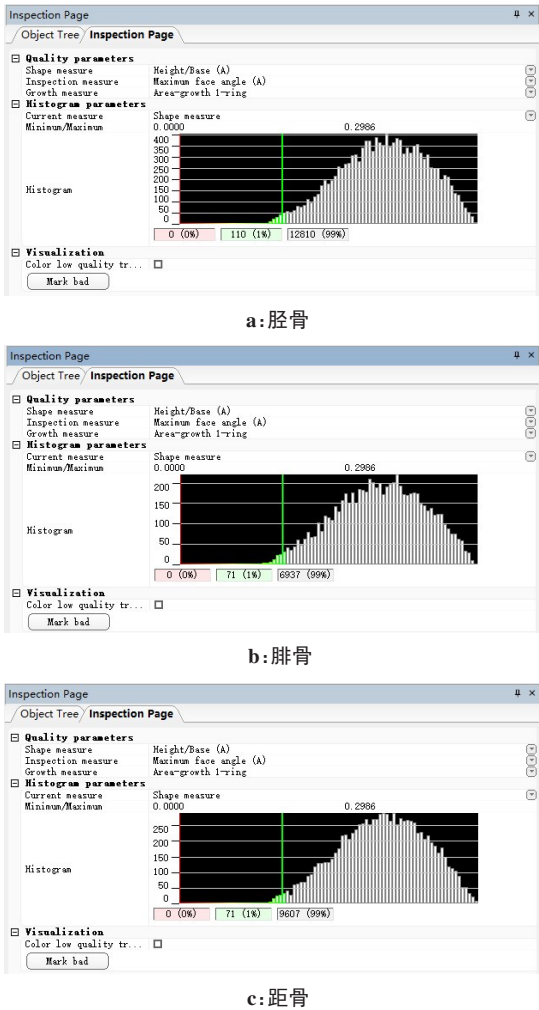
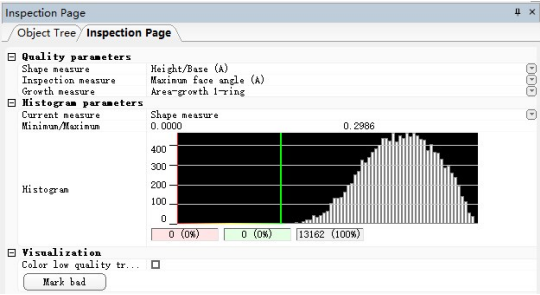


图9 自适应网格划分后胫骨、腓骨和距骨的网格属性
Figure 9 Mesh properties of the tibia, fibula and talus after adaptive meshing

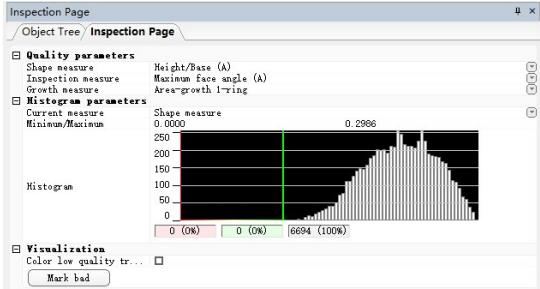
然后对三维模型进行统一网格划分,处理后,胫骨、腓骨、距骨三角面片数量共13 162块、6694块、9140块,均为质量合格的三角片,如图10所示。网格优化前后的踝关节三维模型如图11所示。

最后对三维模型进行体网格划分。创建体网格,元素类型选择四面体10节点,控制边界宽度、最大边界宽度设定为5 mm^[18]。体网格划分完成后,踝关节三维模型如图12所示。

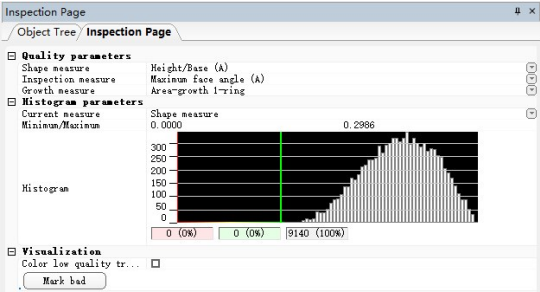
胫骨、腓骨和距骨优化前后各参数对比见表1。由表中数据分析可得,胫骨、腓骨和距骨进行优化前后模型的体积和表面积变化均很小,而优化后三角片数量和节点数量相比于优化前则减少了很多。



a: 胫骨

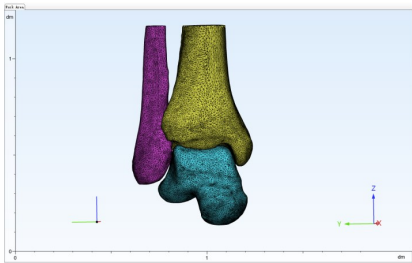


b: 腓骨

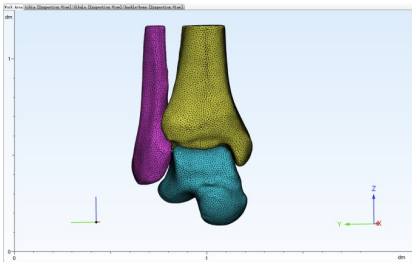


c: 距骨

图10 统一网格后胫骨、腓骨和距骨的网格属性
Figure 10 Mesh properties of the tibia, fibula and talus
after unified meshing



a: 网格优化前



b: 网格优化后

图11 网格优化前后踝关节三维模型比较
Figure 11 Comparison of 3D ankle models of the
ankle joint before and after mesh optimization

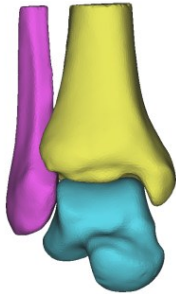


图12 体网格划分后的踝关节模型
Figure 12 Ankle joint model after body mesh generation

表1 优化前后各参数对比
Table 1 Comparison of parameters before and after optimization

| 部位 | 参数 | 优化前 | 优化后 | 后/前(%) |
|----|---------------------|-----------|-----------|--------|
| 胫骨 | 体积/mm ³ | 48 457.84 | 48 296.67 | 99.667 |
| | 表面积/mm ² | 8 221.12 | 8 156.28 | 99.212 |
| | 三角片数量 | 20 114 | 13 162 | 65.437 |
| | 节点数量 | 10 059 | 6 583 | 65.444 |
| 腓骨 | 体积/mm ³ | 14 228.92 | 14 099.73 | 99.092 |
| | 表面积/mm ² | 4 185.73 | 4 136.82 | 98.832 |
| | 三角片数量 | 12 516 | 6 694 | 53.484 |
| | 节点数量 | 6 260 | 3 349 | 53.498 |
| 距骨 | 体积/mm ³ | 29 121.18 | 28 995.83 | 99.570 |
| | 表面积/mm ² | 5 712.93 | 5 660.28 | 99.078 |
| | 三角片数量 | 21 210 | 9 140 | 43.093 |
| | 节点数量 | 10 607 | 4 572 | 43.104 |

4 结 论

在对踝关节三维模型进行网格优化的过程中，模型的尺寸有略微变动,但是踝关节三维模型整体的形状和几何结构并没有发生改变,经过优化后的踝关节三维模型在结构上与人体真实的踝关节结构并无明显的差异^[19]。优化后的踝关节三维模型三角片和节点数量相比于优化前明显减少,有利于后续进行有限元分析,能有效地缩短有限元分析所需时间^[20]。本研究所建立的三维模型精确程度满足要求,对于患者病情的分析及治疗方案的确立具有重要的指导意义。

【参考文献】

[1] 张韵, 芮琳, 邱旭升, 等. 关节镜空心钉内固定治疗后踝骨折手术的护理配合[J]. 护理学杂志, 2019, 34(5): 45-47.
Zhang X, Rui L, Qiu XS, et al. Nursing cooperation during arthroscopic internal fixation with cannulate screw for ankle fracture[J]. Journal of Nursing Science, 2019, 34(5): 45-47.
[2] 冯刚, 段雪艳, 陈雷, 等. CT三维重建技术在足踝部损伤诊断价值分析[J]. 中外医疗, 2020, 39(32): 193-195.
Feng G, Duan XY, Chen L, et al. Analysis of CT three-dimensional

- reconstruction technology in diagnosis of bone and joint injury[J]. China and Foreign Medical Treatment, 2020, 39(32): 193-195.
- [3] Li XC, Zhang JY, Shi WQ, et al. Application of three-dimensional image reconstruction technology based on high-resolution CT in pyeloplasty[J]. Translational Andrology and Urology, 2021, 10(3): 1314-1320.
- [4] 张兵. 生理载荷下椎间盘力学性能的实验研究及有限元分析[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- Zhang B. The experimental study and finite element analysis on the mechanical properties of disc under physiological loads[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
- [5] 刘沫. 髌白后壁缺损受力影响仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- Liu M. Stress effect simulation and investigation of acetabular posterior wall defects[D]. Shenyang: Dongbei University, 2017.
- [6] 徐蕾. DLS与LS生物力学试验和有限元比较研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Xu L. Comparative study on biomechanical test and finite element analysis of DLS and LS. [D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [7] 许田恩. 注射骨水泥对骨质疏松性股骨颈的生物力学影响及有限元分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Xu TE. Biomechanical study and finite element analysis of osteoporotic femur neck injected bone cement [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [8] 李钰军, 余斌, 罗彪, 等. 基于三维重建技术对国人胫骨近端截面的形态学测量[J]. 中国矫形外科杂志, 2009, 17(11): 850-853.
- Li YJ, Yu B, Luo B, et al. Measurement of proximal tibia in normal Chinese people with digital three-dimensional reconstruction technique [J]. Orthopedic Journal of China, 2009, 17(11): 850-853.
- [9] 朱亚敏, 殷向辉, 朱怡怡, 等. CT与MRI扫描三维重建在四肢骨关节隐匿性骨折诊断中的应用[J]. 现代生物医学进展, 2020, 20(22): 4344-4347.
- Zhu YM, Yin XH, Zhu XY, et al. Application of CT and MRI scan three-dimensional reconstruction in the diagnosis of occult fractures of extremities[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2020, 20(22): 4344-4347.
- [10] 王宏. 个性化膝关节占位器的优化设计与应用[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- Wang H. Optimum design and application of personalized knee joint occupier[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.
- [11] 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.
- [12] 师冬丽. 论图像分割技术在医学图像处理中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2021, 5: 132-133.
- Shi DL. The application of image segmentation technology in medical image processing[J]. Computer Programming Skills and Maintenance, 2021, 5: 132-133.
- [13] 石更强. 基于逆向工程个性化三维仿生膝关节股骨和胫骨部分的精确建模[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 35: 6831-6834.
- Shi GQ. Construction of a three-dimensional bionic knee joint model based on reverse engineering [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2008, 35: 6831-6834.
- [14] 刘大健. 基于CT影像的膝关节三维建模及应力分析研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- Liu DJ. Three-dimensional reconstruction and stress analysis of knee joint based on CT image[D]. Shenyang: Dongbei University, 2015.
- [15] 李靖, 杨龙, 王建吉, 等. 基于DICOM数据三维重建及其对骨科植入物的指导应用[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(7): 1046-1051.
- Li J, Yang L, Wang JJ, et al. Three-dimensional reconstruction based on DICOM data and its application for orthopedic implants [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2017, 21(7): 1046-1051.
- [16] 赵学良. 人工踝关节置换的临床观察及新型国产人工踝关节的初步设计[D]. 重庆: 第三军医大学, 2016.
- Zhao XL. A clinical study of total ankle arthroplasty and the primary design of a new chinese ankle prosthesis [D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2016.
- [17] 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 and Health Care, 2021, 29(S1): 221-238.
- [18] 王宇, 卢玲, 李文韬. 基于Ansys的有限元网格划分方法应用研究[J]. 起重运输机械, 2014, 3: 53-56.
- Wang Y, Lu L, Li WT. Ansys-based application research on finite element mesh generation[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2014, 3: 53-56.
- [19] 吴楠, 李岩芳, 蒋振刚. 基于CT图像的肾脏建模方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(5): 105-110.
- Wu N, Li YF, Jiang ZG. Research on kidney modeling method based on CT images[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(5): 105-110.
- [20] 石更强, 吴山山, 陆嘉苑, 等. 基于ANSYS人体膝关节的生物力学分析[J]. 生物医学工程与临床, 2017, 21(5): 459-464.
- Shi GQ, Wu SS, Lu JY, et al. Biomechanical analysis of human knee joint based on ANSYS [J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2017, 21(5): 459-464.

(编辑:谭斯允)