

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2018.01.033

· 生物力学分析 ·

肱骨有限元模型建立及生物力学分析*

曹慧¹ 刘静¹ 郭文文¹ 莫海燕¹ 张俊忠^{2Δ}

(1 山东中医药大学理工学院 山东 济南 250355; 2 山东中医药大学第一附属医院 山东 济南 250014)

摘要 目的:以成人肱骨为例,将医学图像三维重建技术和有限元方法结合应用于正骨手法研究,建立正常肱骨有限元模型,验证模型的有效性并进行生物力学分析。**方法:**选择一位青年男性志愿者,对其上肢自尺桡骨上端至肱骨头进行连续断层扫描,得到CT图像,将CT数据导入MIMICS软件中,通过图像分割、三维重建和材料属性赋值,构建正常肱骨有限元模型,利用ANSYS软件进行力学分析,与文献中肱骨的生物力学数据相比较,以此验证模型的有效性。**结果:**建立了正常肱骨三维几何模型和有限元模型。利用ANSYS软件,对模型进行了有效性验证。所建模型物理特性与真实骨骼相近,能很好地反映骨骼的力学变化,实现手法的定量分析。**结论:**所建立的肱骨模型外形逼真、在不同载荷下的应力值与相关文献一致,可用作中医仿真系统中的虚拟骨折模型。

关键词:中医正骨;三维重建;有限元分析

中图分类号:R683.41;R318.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2018)01-150-05

Humerus Finite Element Model Establishment and Biomechanics Analysis*

CAO Hui¹, LIU Jing¹, GUO Wen-wen¹, MO Hai-yan¹, ZHANG Jun-zhong^{2Δ}

(1 Institute of Science and Technology, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Ji'nan, Shandong, 250355, China;

2 The First Affiliated Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Ji'nan, Shandong, 250014, China)

ABSTRACT Objective: Adult humerus, for example, the medical image 3 d reconstruction technology is combined with the finite element method is applied in bonesetting skill study, establishing normal humerus finite element model, validate the validity of the model and biomechanics analysis. **Methods:** Choose a young male volunteer, the upper arm since the foot radius to the humerus head CT scan in a row, CT image, the CT data import MIMICS software, the grid was divided by image segmentation, 3 d reconstruction, and the material attribute assignment, build normal humerus finite element model, using ANSYS software is analyzed with mechanics, and compared with the biomechanics of the humerus in the literature data, in order to verify the validity of the model. **Results:** Established the normal humerus three-dimensional geometry model and finite element model. By using ANSYS software, the model validation. Subject the model physical properties similar to real bone, can well reflect the bone mechanical change, and realize the methods of quantitative analysis. **Conclusions:** The established model of humerus lifelike shape, stress under different load values are consistent with the literature, can be used as a virtual fracture model in simulation system of traditional Chinese medicine.

Key words: Orthopaedics and traumatology; Three-dimensional reconstruction; Finite element analysis

Chinese Library Classification(CLC): R683.41; R318.01 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2018)01-150-05

前言

本文主要将医学图像三维重建技术和有限元分析方法有机结合,建立人体骨骼三维有限元模型并进行生物力学分析,为之后研究分析中医正骨手法作用下人体相关结构的生物力学改变,对手法操作过程中的力学特征进行数值化提取和分析提供研究基础。

近年来,随着数字医学发展,有限元方法在骨科研究中开始发挥重要作用^[1-3]。将计算机处理图像三维重建与有限元方法

相结合用于中医正骨手法研究^[4,5],可以将手法操作过程中的力学特征进行数值化提取和分析,不但可能精确量化手法的作用机制,也能作为一种客观评价初学者是否完全掌握手法操作特征的方式。临床上,肱骨骨折的发生率较高^[6],故选择以肱骨为例,对其建立三维有限元模型并进行力学实验模拟,为后期中医正骨手法研究中力学信息的研究做准备。

1 材料与方法

1.1 计算机

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(81473708);山东省高校科研发展计划项目(J15LL04);国家自然科学基金面上项目(81373661)

作者简介:曹慧(1963-),硕士,教授,研究方向:生物医学信息处理与分析、医学虚拟现实,电话:13665318806, E-mail: caohui63@163.com

Δ 通讯作者:张俊忠,学士,教授、硕士研究生导师、主任医师,研究方向:复杂性骨折和骨折并发症预防, E-mail: 13793188178@163.com

(收稿日期:2017-04-23 接受日期:2017-05-18)

课题所用计算机操作系统为 Microsoft Windows7, 处理器为 Intel(R) Core(TM)i3, CPU M390 2.67 Hz, 内存 2.0 G, 硬盘 500 G。

1.2 数据来源

数据来源为一健康青年男性志愿者, 25 岁, 身高 175 cm, 体重 62 kg, 采用东芝 320 排动态容积 CT 机, 对其上肢自尺桡骨上端至肱骨头进行连续断层扫描, 层厚设为 2 mm, 共得到 193 张二维 CT 图像, 将数据以 DICOM 格式保存并刻录成 DVD 光盘输出。

1.3 肱骨几何模型建立

首先将建立的 DICOM 数据自动导入 MIMICS 软件, 按照原始横断面、重组冠状面和重组矢状面三个视口显示。使用 Profile Line 工具绘制一条通过分割对象的线段, 根据灰度值沿剖面线的分布曲线, 设定骨骼 CT 值为 226~2511 之间, 将目标区域与背景区域精确分割开来, 得到骨组织阈值分割界面如图 1 所示。

阈值分割后, 将具有相似属性的相邻像素或区域, 集中起来发展成更大的区域^[7], 选取肱骨上一点为种子区域, 进行区域增长, 断层图像中与肱骨灰度值相同的像素都被提取出, 形成新的蒙板。由于尺桡骨与肱骨相连且灰度值相同, 被包含在同一蒙板中, 所以要将其从肱骨中分割出来。同时, "二值化" 图像中存在不连续、不规则的孔洞, 会影响目标信息的完整性^[8]。

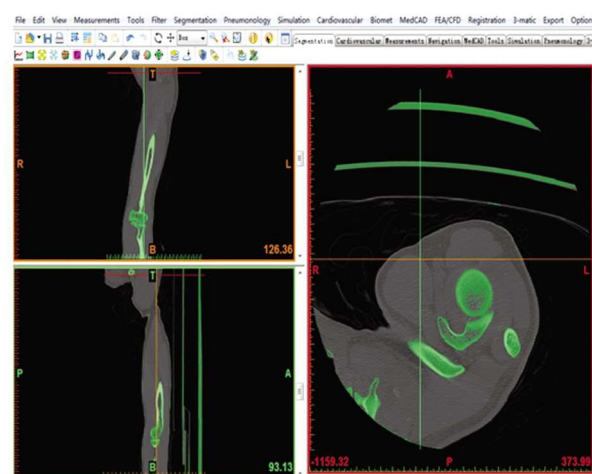


图 1 阈值分割

Fig.1 Threshold segmentation

因此, 对尺桡骨和肱骨相连部分进行了擦除、对孔洞进行了修补, 实现了手动精确分割。最后对编辑后的蒙板进行重建, 得到如图 2a 所示肱骨几何模型。图中显示该模型表面不光滑, 存在毛刺和凹凸不平, 会增加后续计算负担, 影响计算速度, 故对模型进行了光滑 (Smoothing) 和包裹 (Wrap) 等表面优化处理, 得到优化肱骨模型, 如图 2b 所示。

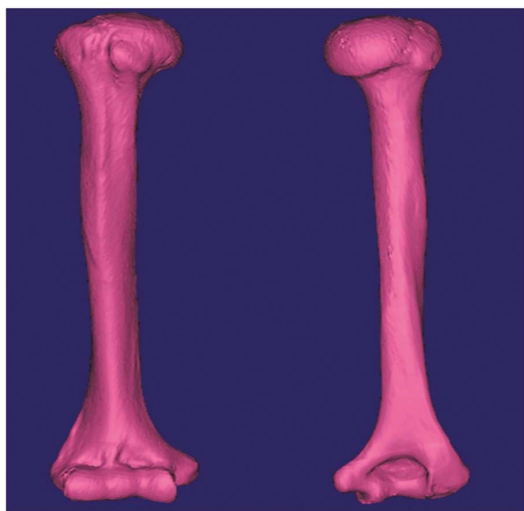


图 2a 初步几何模型

Fig.2a Preliminary geometric model

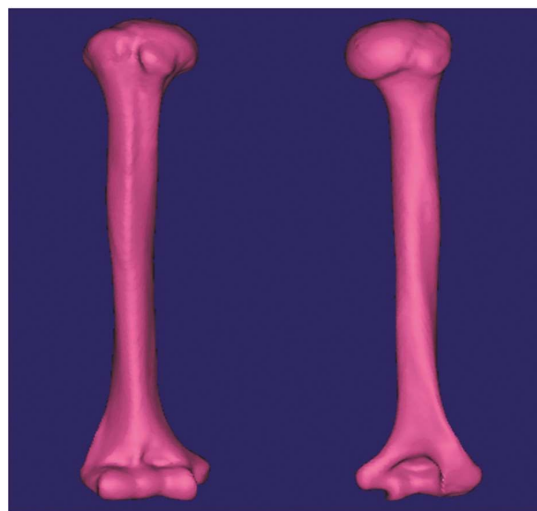


图 2b 优化几何模型

Fig.2b Optimized geometric model

1.4 有限元模型的建立

上述操作生成的三维几何模型是由三角面片组成的空腔结构, 需要转化成实体结构才能进行有限元分析。通过对网格的形状、密度等进行网格划分, 才能将几何模型的三角面片转化为由节点和单元组成的有限元网格模型。

3-matic 软件是 Materialise 公司出品的基于数字化计算机辅助设计 (CAD, computer aided design) 的正向工程软件, 所有的操作都是基于三角面片进行的。其中利用自动网格重划功能能够将达不到预先设置水平的三角面片转化成符合要求的形状, 若在自动网格重划之后仍存在少量低质量的三角片, 则可以手动修改它们的形状。在划分好面网格之后, 利用 Create

Volume Mesh 功能, 可以将面网格转化成体网格, 用于 FEA 前处理。

形成体网格后, MIMICS 中的 FEA 模块可以计算出每个单元的灰度值, 然后根据不同的灰度范围定义相应的材料, 也可以按密度、弹性模量或泊松比来定义材料, 使其成为具有接近真实人体的材料属性和物理特性。将完成体网格赋材质的模型输出成 Ansys 文件, 即可用于有限元分析。

启动 3-matic 软件, 打开肱骨几何模型, 对三角网格反复执行自动优化命令, 直至获取适合进行有限元分析质量的面网格, 之后设置参数, 创建体网格, 本研究模型共生成 10384 个节点和 48119 个单元, 得到如图 3 所示的模型。

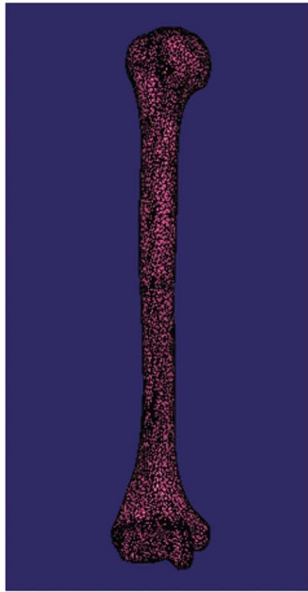


图 3 有限元网格模型

Fig.3 Finite element mesh model

有限元模型不仅应形态逼真,还需在物理性质上与真实人体接近,因此要赋予模型材料属性,从而进一步进行生物力学分析。人体骨骼与工业结构不同,更复杂且不规则,材料分布也因种族、性别、年龄和生理病理的不同而存在差异,所以对不同组织部位的材料属性划分一直为许多学者广泛研究^[9,10]。以往研究中多把骨骼分为密质骨和松质骨两种属性,不符合骨骼材料的复杂性,本课题中根据荀福兴^[1]对模型梯度的划分研究,采用均匀赋值法,结合 MIMICS 提供的经验公示(见公式一和公式二),取泊松比 0.3^[12],将肱骨模型分为 10 个梯度均匀赋值,与人体骨骼特性更为接近,最终得到肱骨有限元模型见图 4。最后,将模型输出保存。

$$\text{Density} = -13.4 + 1017 * \text{Grayvalue} \quad (\text{公式一})$$

$$\text{E-Modulus} = -388.8 + 5925 * \text{Density} \quad (\text{公式二})$$

1.5 模型有效性验证

表 1 肱骨尺桡侧在不同载荷下的应力值变化

Table 1 Changes of stress values of the ulnar and radial sides of the humerus under different loads

Loads	100 N	200 N	300 N	400 N	500 N
Ulnar	5.89± 0.12	8.21± 0.26	17.49± 0.32	35.07± 0.05	42.31± 0.21
Radius	4.88± 0.03	6.05± 0.10	12.25± 0.52	20.33± 0.14	31.12± 0.08
P values	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

2 结果

以人体肱骨 CT 图像为基础,借助 MIMICS 软件生成优化的几何模型,利用 3-matic 形成有限元网格模型,使用 ANSYS 软件对所做模型进行力学分析,对肱尺关节的内髁肱骨滑车处施加轴向的尺骨作用力、在肱桡关节的外髁肱骨小头处施加轴向的桡骨作用力,所得应力值与相关文献一致。

3 讨论

本文以肱骨为例所建立的有限元模型和对其所做的力学分析,旨在为中医正骨手法研究提供一种思路和方法,为建立

对有限元模型进行有效性的验证是进行力学分析的基础和前提^[13,14],通常来说,有效性验证分为两种方法,一种是尸体标本实验验证法^[15-17],另一种是文献验证法。由于实验条件和标本来源的客观条件限制,本课题采用文献验证法验证模型的有效性。

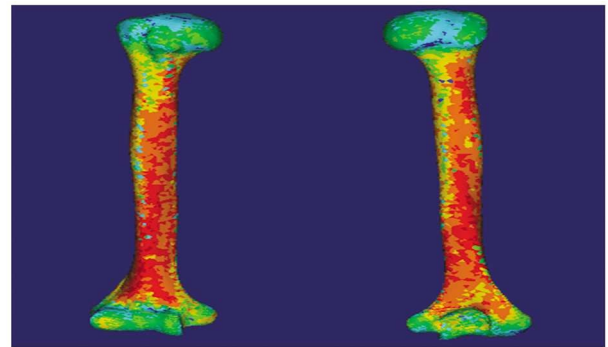


图 4 赋材质后肱骨有限元模型

Fig.4 Finite element model of humerus after assigned material

我们参照刘剑^[18]等人的方法,把模型导入 ANSYS 软件并按照正常人体解剖位置固定,如图 3.15 所示,约束肱骨近端在 X、Y、Z 三个方向自由度为 0,在肱尺关节的内髁肱骨滑车处施加轴向的尺骨作用力,在肱桡关节的外髁肱骨小头处施加轴向的桡骨作用力,按照逐步加载的方法,依次加载 100 N,200 N,300 N,400 N,500 N 的作用力,分别从肱骨髁上区的尺侧和桡侧选取五十个节点,计算其平均应力值,以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)形式表示。肱骨髁上尺桡侧应力结果见表 1,与刘剑等人结果相近,其在不同载荷下的应力图如图 5-8 所示(以载荷 100 N 为例)。我们发现相同载荷下尺侧的平均应力值普遍高于桡侧,这点与王亚斌等^[19]结论一致,同时从云图中可以看到骨干部的应力最大,与何妨^[20]等人的结论一致,可以推测其为肱骨干骨折多发生在骨干中部的原因,以上均可证明所建模型真实有效,并能够为实现中医正骨手法作用力的定量分析提供前期基础准备。

其他部位的各种形式的骨骼有限元模型打下基础。所建立的肱骨三维模型外形逼真,可用作系统用户界面中的虚拟骨折模型。

利用 MIMICS 软件实现了对肱骨 CT 图像的精确分割,建立了三维几何模型,又赋予模型材料属性,将其转化为有限元模型,并按照文献分析法对模型的有效性进行验证。对肱骨近端在坐标系上进行自由度约束,对肱尺关节的内髁肱骨滑车处施加轴向的尺骨作用力,在肱桡关节的外髁肱骨小头处施加轴向的桡骨作用力,依次加载 100 N,200 N,300 N,400 N,500 N 的作用力,结果证明在载荷作用下,模型发生了位移、变形和应力分布的改变。在相同载荷下,肱骨髁上尺桡侧应力表现为尺

侧的平均应力值普遍高于桡侧,且随着载荷的增加,二者的差异更为显著。肱骨干骨折是指发生在肱骨外科颈以下 1-2 cm 至肱骨踝上 2 cm 之间的骨折,占全身所有骨折的 3%^[21],多由

直接或间接暴力造成,以发生在骨干中部的居多,下部次之,上部最少。而由云图可知,肱骨骨干部应力最大,在此区域易形成高应力区,可以推测其为肱骨干骨折多发生在骨干中部的原因。

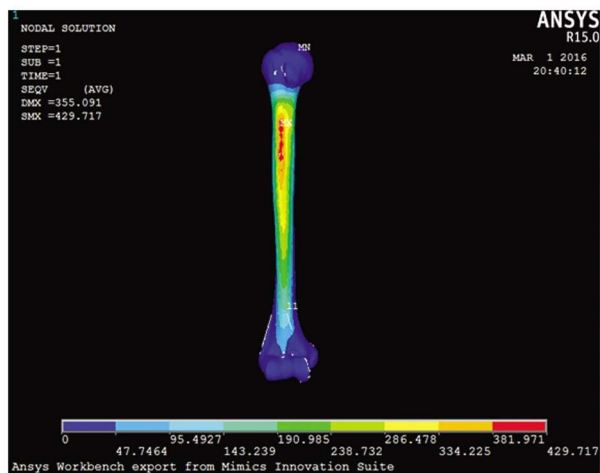


图 5 载荷 100 N 应力云图 a

Fig.5 100 N load stress nephogram a

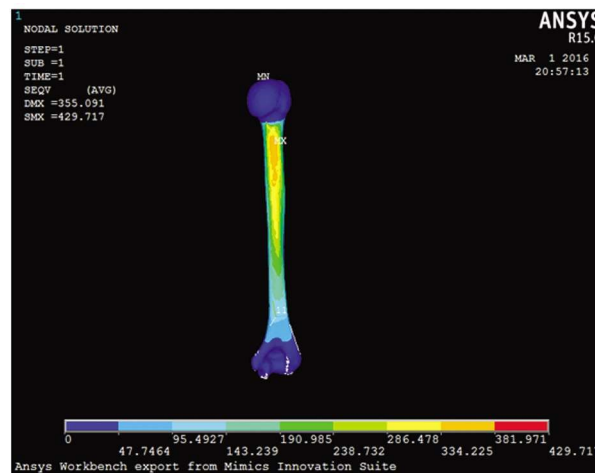


图 6 载荷 100 N 应力云图 b

Fig.6 100 N load stress nephogram b



图 7 载荷 100 N 形变图

Fig.7 100 N load deformation figure

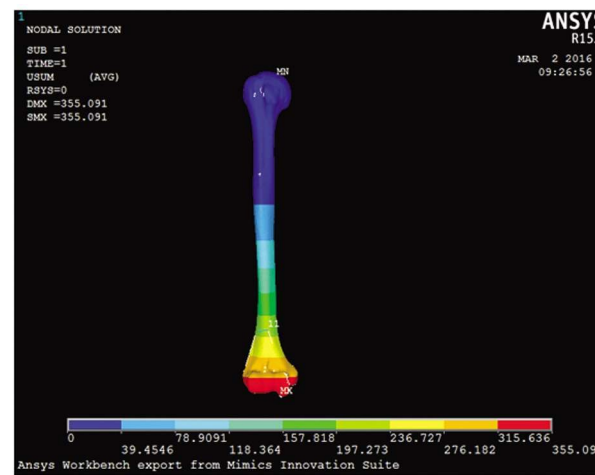


图 8 载荷 100 N 位移变量云图

Fig.8 100N load variable displacement nephogram

但由于有限元方法是一种新兴的研究方法,其在人体结构的生物力学方面还存在一些缺陷:一是由于肌肉的力学特性复杂,功能难以模拟,因此没有考虑肌肉组织对模型的影响;二是由于客观条件限制,对模型有效性验证是参考的相关文献中的力学数据,没有进行实体生物力学实验做对比分析。在今后的研究方向中,我们将建立肱骨骨干骨折有限元模型,并进行中医正骨手法轨迹中力学信息的采集,进而将对象扩大至适用中医正骨手法的各处人体骨骼。

参考文献(References)

- [1] Boyle C, IKim IY. Comparison of different hip prosthesis shapes considering micro-level bone remodeling and stress-shielding criteria using three-dimensional design space topology optimization[J]. Journal of Biomechanics, 2011, 44(9): 1722-1728
- [2] Trabelsi N, Yosibash Z, Wutte C, et al. Patient-specific finite element analysis of the human femur-A double-blinded biomechanical validation[J]. Journal of Biomechanics, 2011, 44(9): 1666-1672

- [3] Elkins IM, Stroud NJ, Rudert MJ, et al. The capsule's contribution to total hip construct stability - A finite element analysis [J]. Journal of Orthopaedic Research, 2011, 29(11): 1642-1648
- [4] 秦太平, 张晓刚, 宋敏. 有限元分析在中医正骨手法治疗腰椎疾病作用机制中的应用 [J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(26): 4913-4917
Qin Da-ping, Zhang Xiao-gang, Song Min. Application of finite element analysis in mechanism of lumbar disease by Chinese medicine bonesetting massage manipulation[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2012, 16(26): 4913-4917
- [5] 李庆兵, 冯跃, 罗建, 等. 有限元分析在手法治疗腰椎间盘突出症中的研究进展[J]. 南京中医药大学学报, 2013, 29(1): 94-96
Li Qing-bing, Feng Yue, Luo Jian, et al. Research progress on finite element analysis in manual therapy treating lumbar disc herniation[J]. Journal of Nanjing University of TCM, 2013, 29(1): 94-96
- [6] Mahabier KC, Hartog DD, Van Veldhuizen J, et al. Trends in incidence rate, health care consumption, and costs for patients admitted

- with a humeral fracture in The Netherlands between 1986 and 2012 [J]. Injury-international Journal of the Care of the Injured, 2015, 46 (10): 1930-1937
- [7] 曹彪. 基于区域生长的 OCT 图像分割算法研究 [D]. 北京: 北京理工大学生物医学工程, 2015
Cao Biao. Research of OCT Image Segmentation Algorithm Based on Region Growing Method [D]. Beijing: School of Life Science Beijing Institute of Technology, 2015
- [8] 张德才, 周春光, 周强, 等. 基于轮廓的孔洞填充算法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2011, 49(1): 82-86
Zhang De-cai, Zhou Chun-guang, Zhou Qiang, et al. Hole-Filling Algorithm Based on Contour[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2011, 49(1): 82-86
- [9] Ciarelli MJ, Goldstein SA, Kuhn JL, et al. Evaluation of Orthogonal Mechanical Properties and Density of Human Trabecular Bone from the Major Metaphyseal Regions with Materials Testing and Computed Tomography [J]. Journal of Orthopaedic Research. 1991, 9 (5): 674-682
- [10] Rho JY, Hobatho MC, Ashman RB. Relations of Mechanical Properties to Density and CT Numbers in Human Bone [J]. Medical Engineering&Physics, 1995, 17(5): 347-355
- [11] 荀福兴. 不同材料属性分配方法对椎体有限元模型力学性能的影响[D]. 广州: 南方医科大学人体解剖与组织胚胎学, 2013
Xun Fu-xing. The influence on the mechanical properties of the vertebral finite element model aroused by different attribute assignment methods[D]. Guangzhou: Southern Medical University Human anatomy and histoembryology, 2013
- [12] Rho JY, Hobatho MC, Ashman RB, et al. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone[J]. Medical Engineering Physics, 1995, 17: 347-355
- [13] Anderson AE, Ellis BJ, Mass SA, et al. Validation of finite element predictions of cartilage contact pressure in the human hip joint[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2008, 130(5): 164
- [14] Dall'Ara E, Schmidt R, Pahr D, et al. A nonlinear finite element model validation study based on a novel experimental technique for inducing anterior wedge-shape fractures in human vertebral bodies in vitro[J]. Journal of Biomechanics, 2010, 43(12): 2374-2380
- [15] Maurel N, Diop A, Grimberg J. A 3D finite element model of an implanted scapula: importance of a multiparametric validation using experimental data[J]. Journal of Biomechanics, 2005, 38(9): 1865-1872
- [16] Stormont TJ, An KN, Morrey BF, et al. Elbow joint contact study: Comparison of techniques [J]. Journal of Biomechanics, 1985, 18(5): 329-336
- [17] Warner JJP, Bowen MK, Deng XH, et al. Articular contact patterns of the normal glenohumeral joint [J]. Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 1998, 7(4): 381-388
- [18] 刘剑, 黄潮桐, 陈隆福, 等. 肱骨髁上部位局部三维构建及有限元分析[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2012, 4(6): 427-431
Liu Jian, Huang Chao-tong, Chen Long-fu, et al. 3D construction and finite element analysis of supracondylar part of humerus [J]. Chinese Journal of Clinical and Basic Orthopaedic Research, 2012, 4 (6): 427-431
- [19] 王亚斌, 周小建, 任亚军, 等. 肱骨远端三维有限元模型的建立及生物力学分析 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(22): 4002-4005
Wang Ya-bin, Zhou Xiao-jian, Ren Ya-jun, et al. Three-dimensional finite element model of the distal humerus and the related biomechanics analysis [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2011, 15(22): 4002-4005
- [20] 何仿, 苟三怀, 卜海富. 不同肩关节功能位置上肱骨三维有限元应力分析[J]. 临床骨科杂志, 2006, 9(6): 559-561
He Fang, Gou San-huai, Bu Hai-fu. Three dimensional finite element analysis of humerus under the different functional position of shoulder[J]. Journal of Clinical Orthopaedics, 2006, 9(6): 559-561
- [21] Carroll EA, Schweppe M, Langfitt M, et al. Management of humeral shaft fractures [J]. Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2012, 20(7): 423-433