

文章编号:1004-7220(2013)04-0432-04

材料属性分配梯度对椎体有限元模型力学性能的影响

荀福兴, 刘雄, 张美超

(南方医科大学 解剖教研室, 广东省医学生物力学重点实验室, 广州 510515)

摘要: **目的** 研究以灰度值为基础的不同材料属性分配梯度对椎体有限元模型力学性能的影响。**方法** 对1位健康成人脊柱(T12~L5节段)进行快速CT薄层扫描,在MIMICS中对每节椎骨进行三维重建,通过Geomagic软件处理后,导入ANSYS中进行网格划分,再返回到MIMICS中按2、4、8、10、50、100、200、400份8种梯度对材料属性进行分配,最后重新导入ANSYS软件按照同一载荷条件进行有限元分析。**结果** 2、4、400这3个分配梯度与其他分配梯度相比,应力情况存在显著性差异($P < 0.05$),而8、10、50、100、200梯度之间计算结果偏差不大。**结论** 有限元模型材料属性划分不宜过多或过少,10份左右的划分梯度既可以保证运算结果的精确性,也相对可以提高运算速度,尤其适用于临床个性化快速有限元建模。

关键词: 有限元分析; 脊柱; 材料属性; 三维重建

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Influence from different assigned gradients of material attributes on mechanical properties of the vertebral finite element model

XUN Fu-xing, LIU Xiong, ZHANG Mei-chao (*Department of Anatomy, Guangdong Provincial Medical Biomechanical Key Laboratory, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China*)

Abstract: **Objective** To study the influence from different assigned gradients of material attributes on mechanical properties of the vertebral finite element model. **Methods** An adult human spine (T12-L5) was CT scanned, and the 3D models of each vertebra were reconstructed in MIMICS, which were then modified in Geomagic and imported into ANSYS for meshing. The element models were imported back to MIMICS and assigned with material properties by separating into 8 kinds of gradients (2, 4, 8, 10, 50, 100, 200, 400 divisions). These models were then imported to ANSYS again for finite element analysis under the same loading condition. **Results** Significant differences were found in stresses from models with 2, 4, 400 gradients, but the deviations between 8, 10, 50, 100, 200 gradients were not obvious. **Conclusions** The material attributes of finite element model should be appropriate, and the assigned gradient of 10 divisions could be better guarantee the accuracy of calculation and enhance the calculation speed as well, which is suitable for personalized rapid finite element modeling in clinic.

Key words: Finite elements analysis; Spine; Material properties; 3D reconstruction

数字医学概念的提出^[1]促进了有限元技术与医学的结合,CT数据集在三维重建方面的广泛应用更加快了这一进程的发展,尤其是在骨骼模型的构

建方面显得特别突出。三维有限元模型不仅适用于分析正常骨骼的应力应变情况,也可以分析骨骼发生骨折的危险系数或内固定物的微动等情况^[2-3]。

收稿日期:2013-03-22; 修回日期:2013-04-30

基金项目:国家863资助项目(2012AA02A603),国家自然科学基金面上项目(81171765)。

通信作者:张美超,副教授,硕士研究生导师, E-mail: zmc@fimmu.com。

在国外,有关脊柱和股骨等部位的有限元相关研究已经大量开展^[4-6];而国内,有限元方面研究也逐渐加深,众多学者都曾在有限元仿真等领域进行相应探索^[7-13]。Marom 等^[3]认为 CT 扫描可以反映出骨骼模型的高特征性。CT 扫描作为一种临床常规体外非侵入性的诊断方法,不仅可以提供骨骼精确的几何学信息,更可以提供骨骼相关的机械性能参数。现阶段,CT 数据在有限元领域的最主要用途是骨骼三维模型构建,而对于有限元模型构建的另一个重要组成部分——材料属性赋值却甚少涉及。骨骼是医学有限元分析的主要对象之一,而人骨的材料属性十分复杂,个体差异明显,不同人或同一人体不同部位之间都存在差别。传统的骨骼材料属性划分方法是将骨单纯分为皮质骨和松质骨两部分进行赋值,这样划分必然与人骨材料属性复杂性不符,在计算中难免会出现较大误差。随着人们对 CT 数据认识的加深和相应软件的开发运用,MIMICS、BONE-MAT^[14]、AMAB^[15]等软件可以把 CT 数据与有限元仿真模型相结合,其分配方案是根据 CT 数据的灰度值来决定有限元模型的材料属性,具体方法是通过提取出单元体积内所有 CT 图像的像素值,计算出其平均值来赋予到该单元中^[16],最终达到通过 CT 灰度值确定有限元模型中每个单元弹性模量的目的。此方法可以较好体现骨组织内部复杂的变化情况;在此基础上,如果有一个较好的分配方案,就可以改善计算中因个体差异性造成的误差。本研究主要是通过研究 CT 灰度值赋值法中划分梯度的变化对有限元分析结果的影响,得出一个相对经济、准确的划分梯度,为将该方法在有限元研究中的应用特别是临床相关快速建模分析等方面提供相关的理论依据。

1 材料与方法

1.1 有限元模型的建立

采集 1 位正常男性青年志愿者(年龄 35 岁,身高 175 cm,体重 65 kg,既往无腰椎病相关病史)CT 数据。采用 64 排螺旋 CT 机(Somatom Plus-64 层,德国)对 T12~L5 节段以 0.5 mm 为间隔,沿轴向进行连续断层扫描,所得图像数据以 dicom 格式保存。

把 CT 数据(dicom 格式)导入 MIMICS 10.0 中,对每节椎骨通过区域划分、空洞填充、区域增长等操

作提取图像的大体 3D 轮廓,模拟出该椎骨特征性的三维模型,并储存为 stl 格式文件备用。

把各椎骨 stl 格式文件分别导入到逆向工程软件 Geomagic studio 11 中,通过松弛、光滑、网格医生等处理得到较好的三维模型,再通过 stl 文件导回 MIMICS 中,使用 Remesh 工具对模型的三角面片进行加工处理,得到较好的面网格模型(见图 1(a)),以 lis 格式文件导入有限元分析软件 ANSYS 中,使用 FVMESH 的方法进行体网格划分(见图 1(b))。存储为 prep7、nodes、elements 3 个文件,备用。

将存储的 prep7、nodes、elements 文件导入 MIMICS 软件中,根据 CT 灰度值分布通过限定材料分配梯度进行材料属性的赋予。本实验对每节椎骨按照 2、4、8、10、50、100、200、400 种 8 种梯度分别赋值,赋值公式来自 MIMICS 中提供的经验公式:

$$\text{Density} = 47 + 1.122 \times \text{Gray value}$$

$$E\text{-Modulus} = -172 + 1.92 \times \text{Density}^{[17-19]}$$

$$\text{泊松比} = 0.3^{[20]}$$

以上公式在划分 2 种材料属性时偏差较大,故本实验采用校正数值定义 2 分法时的材料属性,取灰度值 1 686GV(相应 HU = 662)以上定义为皮质骨,相应的弹性模量为 15 GPa,泊松比为 0.3;取灰度值 1 686GV 以下定义为松质骨,相应的弹性模量为 1.1 GPa,泊松比为 0.3。材料属性分配后的模型以 2 分法、10 分法为例(见图 1(c)、(d))。

最后把赋值后的椎骨有限元模型以 lis、nodes、elements 3 种文件导入 ANSYS 中进行分析。

1.2 有限元分析

对各节段椎骨分别加载,具体加载条件为:(1)在各椎体上表面沿垂直向下方向施加压缩载荷

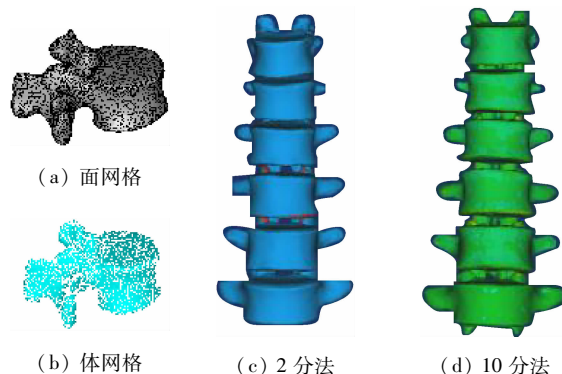


图 1 有限元模型
Fig.1 FE models

600 N;(2)各椎体下表面固定,自由度为0。主要的观察指标:在每节椎体选取4条路径:路径1,椎体上下面中点连线;路径2,沿椎体中央水平面外围;路径3,椎体前后方中点的连线;路径4,椎体中央面左右两侧的连接。求解出2、4、8、10、50、100、200、400种材料属性在4条路径上的应力情况,并加以比较。

2 结果

在不同的材料属性分配情况下,对6节椎体按照所选取的4条路径,分别导出相应的 Von Mises 应力。对同一椎体相同路径下8种不同材料属性的应

力情况加以比较(以L2的4条路径为例),如图2所示。使用SPSS软件对8种分配梯度下的 Von Mises 应力情况进行重复测量方差分析,结果显示2、4、400这3个分配梯度与其他分配梯度相比,应力情况存在显著性差异($P < 0.05$)。观察图2可以看出,8、10、50、100、200这5个分配梯度的应力曲线相对集中,而其他3条(2、4、400梯度曲线)较离散,特别是未经校正的400分法,其变异情况十分明显。综上所述,2、4、400梯度模型与其他梯度模型结果相比偏差较大,8、10、50、100、200梯度之间计算结果偏差不大。

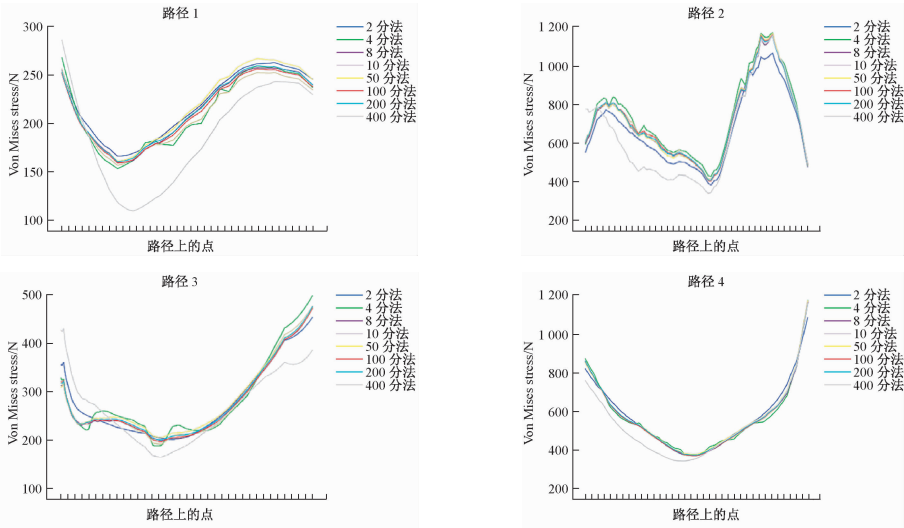


图2 同椎体(L2)4条路径上不同材料属性划分方法下 Von Mises 应力的多重复合线图比较

Fig.2 The multiple line charts of Von Mises stresses of different material properties on the 4 paths in the same vertebra (L2)

3 讨论

有限元分析技术在医学方面特别是骨科中的应用越来越广泛,随着该技术与临床的紧密结合,如何更准确高效地为临床服务是学者们一直关注的问题。高时效性和准确性一直是有限元研究在临床应用中的一个瓶颈。其中材料属性赋值作为有限元模型建立过程中一个重要组成部分,对有限元分析的运算过程及结果影响很大。一个好的材料属性分配方案以满足时效性和准确性两个要求为重要前提,故如何对材料属性进行准确、科学的分配一直是相关研究人员关注的重点。针对这一问题,根据 Marom 等^[3]提出的理论,Zannoni 等^[14]提出一种新

的材料属性赋值方法——CT 灰度值赋值法。此方法使用一些商业的网格化软件根据 CT 灰度等相关信息对单元的弹性模量直接进行赋值,赋值过程中可以根据实际需要进行相应的划分调整使模型更符合要求,已在测试和评估材料属性的分配方面得到应用。

在 CT 灰度值赋值法中,对于材料属性划分梯度学者们存在一定的分歧;一部分认为划分越细致得出的结果越精确,但更多的学者认为一个合理的材料属性分配梯度标准是十分必要的,过度细致并不合理。从本实验结果可见,在以 CT 灰度值为基础的材料属性分配方法中,2、4、400这3个分配梯度与其他分配梯度相比,应力情况存在显著性差异,

特别是划分份数过少或过多时(如2种和400种)的应力情况与其他划分梯度的差异更加明显。在有限元计算过程中,考虑到计算的精确性、运算的工作量等方面问题,选取一种合理的划分方法是有限元技术发展的必然要求。根据本实验的研究结果,在材料属性不被过分细分或过分少分(如2、400分法)的前提下运算结果差异不大,出于提高运算效率方面考虑,10份左右的划分方法比较理想,即10分法可以保证运算的简便性和结果的精确性。

本实验尚存在一定的缺点:①暂时只是分析单节段椎骨,还未在包括椎间盘、韧带等的多节段脊柱上进行比较;②所选椎骨都来自一例标本,略显不足,以后可以对不同样本之间的情况加以比较。

参考文献:

- [1] 钟世镇. 医用生物力学参数的数字化与数字医学[J]. 医用生物力学, 2006, 21(3): 169-171.
Zhong SZ. Digitization of medical biomechanical parameters and digital medicine [J]. J Med Biomech, 2006, 21(3): 169-171.
- [2] Merz B, Niederer P, Muller R, *et al.* Automated finite element analysis of excised human femora based on precision-QCT [J]. J Biomech Eng, 1996, 118(3): 387-390.
- [3] Marom SA, Linden MJ. Computer aided stress analysis of long bones utilizing computed tomography [J]. J Biomech, 1990, 23(5): 399-404.
- [4] O'Reilly MA, Whyne CM. Comparison of computed tomography based parametric and patient-specific finite element models of the healthy and metastatic spine using a mesh-morphing algorithm [J]. Spine, 2008, 33(17): 1876-1881.
- [5] Schmidt H, Heuer F, Drumm J, *et al.* Application of a calibration method provides more realistic results for a finite element model of a lumbar spinal segment [J]. Clin Biomech, 2007, 22(4): 377-384.
- [6] Yosibash Z, Padan R, Joskowicz L, *et al.* A CT-based high-order finite element analysis of the human proximal femur compared to in-vitro experiments [J]. J Biomech Eng, 2007, 129(3): 297-309.
- [7] 张美超, 史风雷, 赵卫东, 等. 髋关节外展不同角度股骨颈应力分布的有限元分析[J]. 第一军医大学学报, 2005, 25(10): 1244-1246.
- [8] 张美超, 夏虹, 樊继宏. 人体骨骼有限元几何模型的重建[J]. 中国临床解剖学杂志, 2003, 21(5): 531-532.
- [9] 张美超, 钟世镇. 国内生物力学中有限元的应用研究进展[J]. 解剖科学进展, 2003, 9(1): 53-56.
- [10] Peng L, Bai J, Zeng X, *et al.* Comparison of isotropic and orthotropic material property assignments on femoral finite element models under two loading conditions [J]. Med Eng Phys, 2006, 28(3): 227-233.
- [11] 王海鹏, 王友, 容可, 等. 三维有限元法分析膝关节内侧副韧带的生物力学功能[J]. 医用生物力学, 2012, 27(1): 40-45.
Wang HP, Wang Y, Rong K, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on biomechanical functions of medial collateral ligament in knee joint [J]. J Med Biomech, 2012, 27(1): 40-45.
- [12] 黄菊英, 李海云, 吴浩. 腰椎间盘突出症力学特征的仿真计算方法[J]. 医用生物力学, 2012, 27(1): 96-101.
Huang JY, Li HY, Wu H. Simulation calculation on biomechanical properties of lumbar disc herniation [J]. J Med Biomech, 2012, 27(1): 96-105.
- [13] 黄文华, 李义凯, 赵卫东, 等. 一种新型颈前路钢板的三维稳定性生物力学评价[J]. 医用生物力学, 2001, 16(4): 219-221
Huang WH, Li YK, Zhao WD, *et al.* Cervical spine butterfly plate for unstable cervical spine: A biomechanical evaluation in vitro [J]. J Med Biomech, 2001, 16(4): 219-221.
- [14] Zannoni C, Mantovani R, Viceconti M. Material properties assignment to finite element models of bone structures: A new method [J]. Med Eng Phys, 1999, 20(10): 735-740.
- [15] Kluess D, Souffrant R, Mittelmeier W, *et al.* A convenient approach for finite-element-analyses of orthopaedic implants in bone contact: Modeling and experimental validation [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2009, 95(1): 23-30.
- [16] Taddei F, Pancanti A, Viceconti M. An improved method for the automatic mapping of computed tomography numbers onto finite element models [J]. Med Eng Phys, 2004, 26(1): 61-69.
- [17] 张国栋, 毛文玉, 廖维靖, 等. 基于三维重建技术及有限元分析的脊柱骨密度测量及其意义[J]. 中国临床解剖学杂志, 2010, 28(1): 78-84.
- [18] Taylor WR, Roland E, Ploeg H, *et al.* Determination of orthotropic bone elastic constants using FEA and modal analysis [J]. J Biomech, 2002, 35(6): 767-773.
- [19] Hobatho MC, Rho JY, Ashman RB. Anatomical variation of human cancellous bone mechanical properties in vitro [J]. Stud Health Technol Inform, 1997, 40: 157-173.
- [20] Lengsfeld M, Schmitt J, Alter P, *et al.* Comparison of geometry-based and CT voxel-based finite element modeling and experimental validation [J]. Med Eng Phys, 1998, 20(7): 515-522.