

中下胸椎肋椎单元三维有限元模型的建立☆

赵岩^{1,2}, 江建明¹, 李筱贺³, 霍洪军², 左媛², 肖宇龙², 杨学军²

Establishing three-dimensional finite element model of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra

Zhao Yan^{1,2}, Jiang Jian-ming¹, Li Xiao-he³, Huo Hong-jun², Zuo Yuan², Xiao Yu-long², Yang Xue-jun²

Abstract

BACKGROUND: It has the great significance to establish the finite element model of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra for more mechanical analysis.

OBJECTIVE: To establish the three-dimensional finite element model of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra through the CT scanning combined with reverse engineering software.

METHODS: One case without disorders of spinal and osteoporosis was selected from the Video Branch in the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical College. It was used to establish the human integrity three-dimensional finite element model of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebral and intervertebral discs. The data were extracted directly from CT image by the means of the medical image processing software Mimics, and the model was modified in the visual interface by the means of platform of reverse engineering technology Geomagic.

RESULTS AND CONCLUSION: The three-dimensional reconstruction of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebral of human was performed through the reverse engineering software including Mimics and Geomagic, and combined with the technology of CT scan. This way reproduced the characters of the appearance and anatomy accurately, and achieved fine distinguish of the internal vertebral structure. There were 132 649 tetrahedral elements in every rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra. It suggests that this method can improve the efficiency and maneuverability of the modeling, and can successfully establish the finite element model conforming to the experimental requirements.

Zhao Y, Jiang JM, Li XH, Huo HJ, Zuo Y, Xiao YL, Yang XJ. Establishing three-dimensional finite element model of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2012;16(22): 3996-4000. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

¹Department of Spinal Surgery, Nanfang Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510515, Guangdong Province, China; ²Department of Spinal Surgery, the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical College, Hohhot 010030, Inner Mongolia Autonomous Region, China; ³Department of Anatomy, School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical College, Hohhot 010059, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Zhao Yan☆, Studying for doctorate, Attending physician, Department of Spinal Surgery, Nanfang Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510515, Guangdong Province, China; Department of Spinal Surgery, the Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical College, Hohhot 010030, Inner Mongolia Autonomous Region, China nmgzy4568@126.com

Corresponding author: Jiang Jian-ming, Professor, Chief physician, Doctoral supervisor, Department of Spinal Surgery, Nanfang Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510515, Guangdong Province, China jjm19991999@sohu.com

Received: 2012-02-02
Accepted: 2012-03-29

摘要

背景: 建立中下胸椎肋椎单元有限元模型对进一步的力学分析意义重大。

目的: 通过 CT 扫描结合逆向工程软件建立中下胸椎肋椎单元三维有限元模型。

方法: 选择内蒙古医学院附属第二医院影像科无脊柱疾患和骨质疏松标本 1 例, 利用医学图像处理软件 Mimics 实现直接从 CT 图像中提取数据, 再利用逆向工程技术平台 Geomagic, 在可视化的界面对模型进行修改, 建立人完整中下胸椎肋椎单元、椎间盘的有限元模型。

结果与结论: 利用 Mimics, Geomagic 等逆向工程软件, 结合 CT 扫描技术对人中下胸椎肋椎单元进行了三维重建, 精确再现了中下胸椎肋椎单元外形解剖特征, 实现了对椎体组织内部不同结构的精细区分, 中下胸椎肋椎单元共具有 132 649 个四面体单元。提示此方法可以提高建模的效率和可操作性, 能够成功建立符合实验要求的有限元模型。

关键词: 中下胸椎肋椎单元; 逆向工程; 有限元; 生物力学; 数字医学
doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.22.002

赵岩, 江建明, 李筱贺, 霍洪军, 左媛, 肖宇龙, 杨学军. 中下胸椎肋椎单元三维有限元模型的建立[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(22):3996-4000. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

随着有限元软件功能的不断开发, 人们对脊柱生物力学特性的认识不断深入, 有限元分析法可对形态、结构、材料和载荷情况及其复杂构件进行应力、应变分析, 而且具有力学性能测试方便、可重复性、可控性等优点, 目前已广泛应用于脊柱的复杂结构生物力学中^[1-4]。本文将非脊柱疾患病例CT资料利用Mimics等逆向工程软件建立中下胸椎肋椎单元及椎间盘有限元模型。

1 对象和方法

设计: 数字化医学、三维有限元分析。

时间和地点: 于2011年在内蒙古医学院第二附属医院完成。

对象: 选择于2011年在内蒙古医学院第二附属医院进行影像学检查的患者1例, 男, 43岁, 身高173 cm, 体质量70 kg。患者无脊柱疾患和骨质疏松, 对试验方案知情同意, 身高和体质量符合国人正常分布区间标准^[5]。

软件及仪器: 联想笔记本电脑(Thinkpad

X220i, CPU, 2 G内存); Mimics 12.0软件(Materialise, Belgium); Geomagic Studio 9 (Raindrop Geomagic, USA); Ansys 10.0 (Ansys, Inc., USA); CT(GE Light speed VCT 64层螺旋CT机, GE公司, 美国)。

方法:

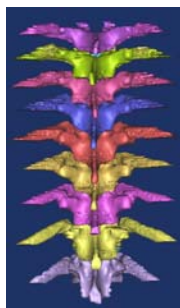
螺旋CT扫描: 对已选定的观察对象进行CT扫描及图像处理。患者取仰卧位, 扫描断面与身体长轴垂直。扫描T₄₋₁₂共获得230层, 管电压120 kV, 管电流400~660 mAs, 层厚0.625 mm, 螺距0.20~0.26, 旋转时间0.35 s, 视野(FOV)为250 mm×250 mm, 矩阵为512×512。

CT图像处理与下载: 在CT工作站中, 通过调整图像灰度等对图像观察细节进行调整, 得到144幅清晰骨窗断层图像, 将其保存为DICOM格式。

CT图像处理与椎体三维模型的建立: 将DICOM格式文件导入Mimics 12.0, 利用Threshold选择拟重建部分, 以不同颜色形成不同的蒙面, 并对图像进行修改, 使重建图像准确。利用Region growth对选定的不同结构图像分割。最后采用3D计算对蒙面分别进行重建, 清楚地再现骨结构的三维形态, 见图1, 2。



a: Sagittal position



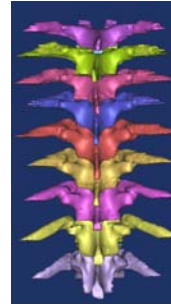
b: Latter coronal position

Figure 1 Different perspective three-dimensional reconstruction map of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra and the intervertebral discs (unmodified reconstruction map)

图1 中下胸椎肋椎单元及椎间盘不同视角三维重建图(重建未修饰前)



a: Sagittal position



b: Latter coronal position

Figure 2 Different perspective three-dimensional reconstruction map of the rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebra and the intervertebral discs (modified reconstruction map)

图2 中下胸椎肋椎单元及椎间盘不同视角三维重建图(重建修饰后)

重建后将T₄₋₁₂肋椎单元的三维模型以stl格式保存。

三维模型的边界修改实体模型的建立: 在Geomagic软件中对初步拟合的三维模型进行精修, 选择切向连续及曲面连续, 以保证模型的真实性和完整性。

采取自动及手工添加的方式, 确定模型的关键点, 根据关键点连接曲线, 通过形态曲线构建曲面, 曲面的数量取决于关键点的数量和曲线的连接方式。

利用Geomagic的诊断功能, 查找不良的曲面间夹角, 进一步修整模型, 缝合曲面, 形成实体模型。

椎间盘界定周围的纤维环和中间的髓核, 以椎间盘为中心做二维图像分割, 去处冗余数据, 经3D计算建立中下胸段椎间盘的三维几何实体模型。

修整完成后的中下胸椎肋椎单元三维模型分别以stl格式输出, 见图3。

三维有限元模型的构建: 将三维模型导入到Mimics 12.0中, 利用remesh进行网格精度锐减和质量优化, 见图4, 5。

¹南方医科大学南方医院脊柱骨病外科, 广东省广州市 510515; ²内蒙古医学院第二附属医院脊柱外科, 内蒙古自治区呼和浩特市 010030; ³内蒙古医学院基础医学院解剖学教研室, 内蒙古自治区呼和浩特市 010059

赵岩☆, 男, 1977年生, 南方医科大学在读博士, 主治医师, 主要从事脊柱外科的研究。
nmgzy4568@126.com

通讯作者: 江建明, 教授, 主任医师, 博士生导师, 南方医科大学南方医院脊柱骨病外科, 广东省广州市 510515
jjm19991999@sohu.com

中图分类号: R318
文献标识码: A
文章编号: 1673-8225 (2012)22-03996-05

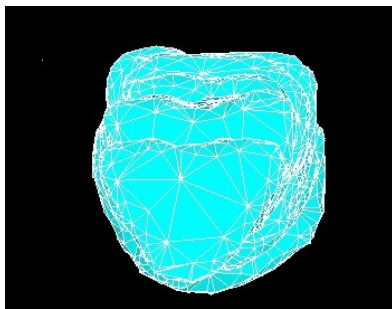
收稿日期: 2012-02-02
修回日期: 2012-03-29
(20120202010/
WLM · C)



a: Three-dimensional reconstruction of lower thoracic disc



b: Meshing of the coronal plane



c: Meshing of the horizontal disc body

Figure 3 Three-dimensional reconstruction of middle and lower thoracic disc and finite element meshing

图3 中下胸椎椎间盘三维重建及有限元体网格划分



Figure 4 Finite element meshing of rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebral and intervertebral discs (coronal)

图4 中下胸椎肋椎单元及椎间盘有限元体网格划分(冠状位)

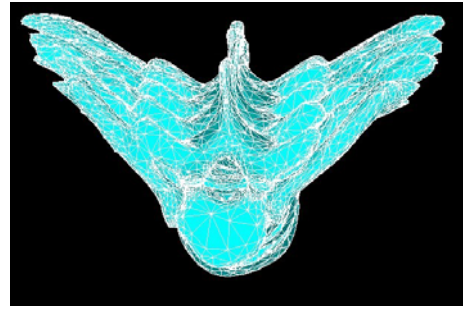


Figure 5 Finite element meshing of rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebral and intervertebral discs (horizontal)

图5 中下胸椎肋椎单元及椎间盘有限元体网格划分(水平位)

输出面网格文件, 用ANSYS转化体网格并导回Mimic进行材料分配。Mimics FEA根据不同灰度范围定义相应材料, 各材料赋值参照以往文献[6-7], 见表1。建立其有限元模型。

表1 材料属性赋值参照标准
Table 1 Reference of the material property assignment

Site	Element type	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Cortical bones	8-node solid	12 000	0.30
Cancellous bones	8-node solid	345	0.20
End plate	8-node solid	12 000	0.30

主要观察指标: 中下胸椎三维有限元模型的面网格和体网格数量; 中下胸椎三维有限元模型4种运动状态下应力分布。

2 结果

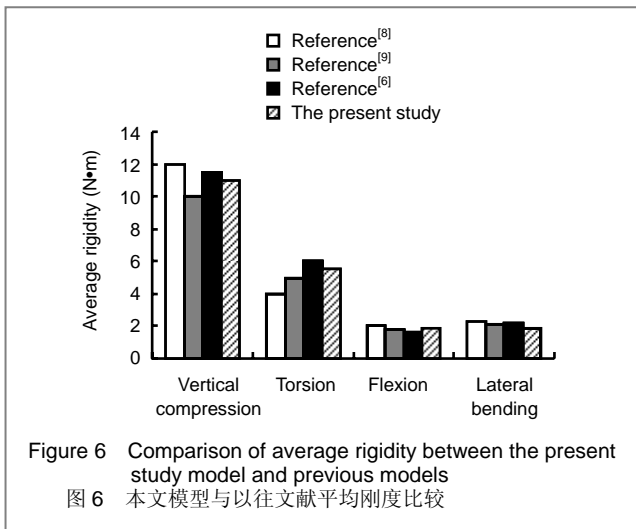
2.1 三维重建结果 见表2。

表2 中下胸椎肋椎单元及椎间盘有限元划分
Table 2 Finite element meshing of rib vertebral unit of the middle and lower thoracic vertebral and intervertebral discs (ID)

Site	Amount
T ₄	11 114
T ₄₋₅ ID	1 847
T ₅	12 424
T ₅₋₆ ID	1 952
T ₆	13 847
T ₆₋₇ ID	2 063
T ₇	14 280
T ₇₋₈ ID	2 258
T ₉	15 358
T ₉₋₁₀ ID	2 424
T ₁₀	16 912
T ₁₀₋₁₁ ID	2 656
T ₁₁	18 245
T ₁₁₋₁₂ ID	3 214
T ₁₂	19 925

通过逆向工程软件,结合CT技术对人中下胸椎肋椎单元及椎间盘进行了三维重建。模型精确再现了中下胸椎及附属结构解剖特征,并同时实现了对椎体组织的精细区分,中下胸椎共具有132 649个四面体单元,

2.2 三维有限元模型的验证 为了验证本模型的有效性,模拟对模型进行垂直压缩、扭转、屈曲作用中的平均刚度测定,与前人研究结果进行比较,结果表明,本模型试验结果与相关文献报道基本吻合,见图6。达到了建模精度与研究需要,所建的三维有限元模型是有效可靠的,可以应用于临床和试验研究。



3 讨论

3.1 有限元模型的建立 目前最为常用的方法是图像建模,用Digital Imaging and Communications in Medicine软件,即DICOM为存储格式的图像处理软件,直接读入CT机输出的数据文件,存储在计算机中,而且还可以改善CT图像质量。DICOM文件提供了非常精细的组织密度信息^[7]。CT扫描数据可以通过CT机自带的软件或第三方软件Mimics, Simpleware等把二维像素转变为立方有限单元,其优点为每个二象像素的骨密度能真实反映椎骨的骨质结构。在第三方软件中可以依据三维像素灰度值的不同定义每个单元的杨氏模量,所以通过CT扫描数据建模被认为是至今为止最为准确的有限元建模方法^[8-9]。近年来有学者结合CT三维影像重建技术和三维有限元分析技术,通过CT三维影像重建技术直接建立脊柱三维有限元模型^[6]。

3.2 逆向工程 亦称反求工程,是根据已经存在的产产品模型,反向推出产品设计数据(包括设计图纸或数字模型)的过程。本文有限元模型的建立是逆向工程的一部分,即对已存在的实体(中下胸椎肋椎单元及椎间盘等),通过数据扫描获取数据,再经过逆向工程软件将实体的数据信息转化为三维模型,继而进行有限元分析或

CAD/CAM。

3.3 实验模型的特点 Mimics 12.0是一个CT、MRI图像显示和分割工具,同时也可以将模型进行3D处理,在医学上,可以用来进行诊断,手术计划等。Geomagic拥有CAD软件中parasolid实体建模技术,能高效的构建曲面与立体修改功能^[10]。对于常规的建模,对轮廓的边界坐标要进行测量或读取,采用点、线、面、体的建模方法,过程复杂,临床医生应用困难。

实验通过较为成熟的医学图像处理软件Mimics实现从CT图像中提取数据建立中下胸椎肋椎单元及椎间盘,完成数据与逆向工程软件间的衔接,利用Geomagic对模型进行修改,显著缩短了建模时间,提高了建模的效率和可操作性。同时,将逆向工程技术引入模型的建立中,成功建立了表面形态和内部组织结构都与实体一致的模型,具有结构完整,空间结构准确度高,单元划分精细等特点。该模型能以STL、IGES等文件输出,以用于计算机辅助设计、快速成型、有限元分析等领域的研究,实现了数据资源的共享。在国内尚属首次,并为今后进一步的研究奠定了基础。

但实验还存在一些不足,如建立的模型,只是对真实脊柱节段的简易模拟,与真实活体仍有一定的差距;椎体、椎间盘等形态力学和性质极复杂^[10-16],难以得到精确的测定数据,单元的弹性模量并不能精确代表椎骨内力学性能分布情况;中胸椎附近的一些更精确结构的影响如脊髓、神经根等,目前尚无法全面的考虑,更精确、仿真程度更高的中下胸椎肋椎单元及椎间盘有限元模型有待于不断的改进和提高。

4 参考文献

- [1] Boccaccio A, Vena P, Gastaldi D, et al. Finite element analysis of cancellous bone failure in the vertebral body of healthy and osteoporotic subjects. Proc Inst Mech Eng H. 2008;222(7):1023-1036.
- [2] 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. Spine. 2008;33(17):1876-1881.
- [3] Liu K, VanLandingham MR, Ovaert TC. Mechanical characterization of soft viscoelastic gels via indentation and optimization-based inverse finite element analysis. J Mech Behav Biomed Mater. 2009;2(4):355-362.
- [4] Chen L, Ashton-Miller JA, DeLancey JO. A 3D finite element model of anterior vaginal wall support to evaluate mechanisms under lying cystocele formation. J Biomech. 2009;42(10):1371-1377.
- [5] Zhongguo Xuesheng Tizhi yu Jiankang Yanjiuzu. Beijing: Gaodeng Jiaoyu Chubanshe. 2002. 中国学生体质与健康研究组编. 2000年中国学生体质与健康调研报告[M].北京:高等教育出版社.2002.
- [6] Little JP, Adam CJ. The effect of soft tissue properties on spinal flexibility in scoliosis: biomechanical simulation of fulcrum bending. Spine. 2009;34(2):E76-82.
- [7] Nagasao T, Iwabuchi M, Tsuchiya Y, et al. Finite element analysis of the stresses around endosseous implants in various reconstructed mandibular models. J Craniomaxillofac Surg. 2002;30(3):170-177.
- [8] Ao J, Jin AM, Fang GR, et al. Zhongguo Linchuang Jiepouxue Zazhi. 2008;26(4):429-432. 敖俊,靳安民,方国荣,等.前路腰椎椎间融合后路关节突螺钉固定术螺钉应力的有限元研究[J].中国临床解剖学志,2008,26(4):429-432.

[9] Kim HJ, Chun HJ, Kang KT, et al. A Validated finite element analysis of never root stress in degenerative lumbar scoliosis. *Med Biol Eng Comput.* 2009;47(6):559-605.

[10] Eswaran SK, Gupta A, Adams MF, et al. Cortical and trabecular load sharing in the human vertebral body. *J Bone Miner Res.* 2006;21(2):307-314.

[11] Schroeder Y, Wilson W, Huyghe JM, et al. Osmoviscoelastic finite element model of the intervertebral disc. *Eur Spine J.* 2006;15 Suppl 3:S361-371.

[12] Nararajan RN, Williams JR, Anderson GB. Modelling changes in intervertebral disc mechanics with degeneration. *J Bone Joint Surg Am.* 2006;88 Suppl 2:36-40.

[13] Rohlmann A, Bauer L, Zander T, et al. Determination of trunk muscle forces for flexion and extension by using a validated finite element model of the lumbar spine and measured in vivo data. *J Biomech.* 2006;39(6):981-989.

[14] Woldtvedt DJ, Womack W, Gadomski BC. Finite element lumbar spine facet contact parameter predictions are affected by the cartilage thickness distribution and initial joint gap size. *J Biomech Eng.* 2011;133(6):061009.

[15] Galbusera F, Schmidt H, Neidlinger-Wilke C, et al. The effect of degenerative morphological changes of the intervertebral disc on the lumbar spine biomechanics: a poroelastic finite element investigation. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2011;14(8):729-739.

[16] Jackson AR, Huang CY, Gu WY. Effect of endplate calcification and mechanical deformation on the distribution of glucose in intervertebral disc: a 3D finite element study. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2011;14(2):195-204.

来自本文课题的更多信息—

作者贡献: 江建明进行实验设计, 实验实施为赵岩, 实验评估为李筱贺, 资料收集为左媛, 赵岩成文, 霍洪军、肖宇龙、杨学军审校, 赵岩对文章负责。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理要求: 研究取得受试者的知情同意。

本文创新性: 实验通过较为成熟的医学图像处理软件 Mimics 实现从 CT 图像中提取数据建立中下胸椎肋椎单元及椎间盘, 完成数据与逆向工程软件间的衔接, 利用 Geomagic 对模型进行修改, 显著缩短了建模时间, 提高了建模的效率和可操作性。同时, 将逆向工程技术引入模型的建立中, 成功建立了表面形态和内部组织结构都与实体一致的模型, 具有结构完整, 空间结构准确度高, 单元划分精细等特点。

STROBE Statement-Checklist of items that should be included in reports of cohort studies

STROBE 声明: 队列研究报告写作清单①对文题、摘要、引言、方法的写作要求

I. Title and abstract 标题和摘要

1 (a) Indicate the study's design with a commonly used term in the title or the abstract

用常用术语在标题和摘要中指出研究设计

(b) Provide in the abstract an informative and balanced summary of what was done and what was found

在摘要中充分、简洁提供所做和所发现的

II. Introduction 引言

Background / rationale 背景和理论基础

2 Explain the scientific background and rationale for the investigation being reported

解释其科学背景和理论基础

Objectives 目的

3 State specific objectives, including any prespecified hypotheses

陈述具体目的, 包括任何预先设定的假设

III. Methods 方法

Study design 研究设计

4 Present key elements of study design early in the paper

陈述论文研究设计主要因素

Setting 环境

5 Describe the setting, locations, and relevant

dates, including periods of recruitment, exposure, follow-up, and data collection

描述环境, 地点和日期, 包括收集, 暴露, 随访和数据收集周期

Participants 参加者

6 (a) Give the eligibility criteria, and the sources and methods of selection of participants. Describe methods of follow-up

列出参加者选择的标准, 来源和方法。描述随访方法

(b) For matched studies, give matching criteria and number of exposed and unexposed

配对研究给出配对标准, 以及暴露和非暴露数字

Variables 变量

7 Clearly define all outcomes, exposures, predictors, potential confounders, and effect modifiers. Give diagnostic criteria, if applicable

清晰的列出所有成果, 暴露, 预测, 潜在的混杂因素, 效果控制。如果可能, 给出诊断标准

Data sources / measurement 数据源和测量

8 For each variable of interest, give sources of data and details of methods of assessment (measurement). Describe comparability of assessment methods if there is more than one group

对每个兴趣变量给出详细的测定方法。若超过一个组, 描述组间的测定方法可比性

Bias 偏差

9 Describe any efforts to address potential sources of bias

描述任何在测定过程中可能产生偏差的原因

Study size 研究规模

10 Explain how the study size was arrived at

解释如何达到规模

Quantitative variables 定量变量

11 Explain how quantitative variables were handled in the analyses. If applicable, describe which groupings were chosen and why

解释在分析中定量变量如何掌控。如果适用, 描述选择的组别并阐述原因

Statistical methods 统计方法

12 (a) Describe all statistical methods, including those used to control for confounding

描述所有统计方法, 包括用来控制混杂因素的方法

(b) Describe any methods used to examine subgroups and interactions

描述检查亚组及相互作用的方法

(c) Explain how missing data were addressed

解释如何处理失访材料

(d) If applicable, explain how loss to follow-up was addressed

如果适用, 解释如何处理随访丢失

(e) Describe any sensitivity analyses

描述任何敏感性分析
(资料来源于Google的检索和整理)