

· 基础研究 ·

颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型创建方法的研究

张明才¹, 吕思哲², 詹红生¹, 顾力栩², 石印玉¹, 王翔¹, 黄仕荣¹

(1.上海中医药大学附属曙光医院,上海 200021;2.上海交通大学软件学院)

【摘要】 目的:“椎骨错缝”是颈椎病临床发病的主要病理环节之一,同时也是手法临床干预靶点。结合三维有限元分析技术探讨颈椎“椎骨错缝”可视化模型的创建方法。**方法:**选取颈椎病患者,通过颈椎动静态触诊和 X 线判定发生“椎骨错缝”的患者 1 例(男性,28 岁,身高 176 cm,体重 69 kg),CT 扫描 C₁-C₇(层厚 0.75 mm),基于 CT 数据,应用特定三维有限元分析软件对“椎骨错缝”节段(C₄₋₆)进行三维有限元模型创建。**结果:**重建出的颈椎“椎骨错缝”三维模型证实,参照相邻椎体序列,C₅椎体发生明显的三维空间位置异常,空间位移是向下平移 0.9 mm,绕 X 轴顺时针旋转 4.5°,呈现后仰式错缝,并能对错缝导致关节异常应力进行有限元分析。**结论:**本研究提出的颈椎“椎骨错缝”的建模思路与方法可靠,为后期手法矫正“椎骨错缝”的机制分析奠定基础。

【关键词】 颈椎病; 三维有限元; 有限元分析; 图像处理,计算机辅助

DOI:10.3969/j.issn.1003-0034.2010.05.016

Study on the method of construct the three-dimensional finite element model of cervical vertebrae semidislocation

ZHANG Ming-cai, LÜ Si-zhe, ZHAN Hong-sheng*, GU Li-xu, SHI Yin-yu, WANG Xiang, HUANG Shi-rong. *Shuguang Hospital Affiliated to Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200021, China

ABSTRACT Objective: Cervical vertebra semidislocation was one of major pathological aspects of cervical spondylosis, and it was also the target of manipulation to treat cervical spondylosis. The aim of this study was to combine the technology of three dimensional finite element analysis to investigate the method to construct the cervical vertebra semidislocation model. **Methods:** A cervical spondylosis patient (male, 28 years old, 176 cm tall, weight 69 kg) was randomly choosed, who was diagnosed cervical vertebra semidislocation by dynamic and static palpation and X-ray, and CT scanned from C₁ to C₇ by 0.75 mm slice thickness. Based on the CT data, the software was used to construct the three dimensional finite element model of cervical vertebra semidislocation (C₄-C₆). **Results:** The model showed the three dimensional changes of vertebra semidislocation clearly. C₅ had a three-dimensional abnormal position, which was downward translation for 0.9 mm and clockwise rotation for 4.5° around X-axis. So C₅ was diagnosed as hypsokinesis-type semidislocation. **Conclusion:** The method to construct the three dimensional finite element model of cervical vertebra semidislocation is reliable, which provide a base study to analyse the mechanism of manipulation to treat vertebra semidislocation.

Key words Cervical spondylosis; Three-dimensional finite element; Finite element analysis; Image processing, computer-assisted

Zhongguo Gushang/China J Orthop & Trauma, 2010, 23(5):366-369 www.zggszz.com

中医“椎骨错缝”理论是中医脊柱推拿手法存在和发展的理论基石,同时也是脊柱常见疾患手法治疗的靶点^[1-5],在颈椎“椎骨错缝”理论指导下,中医手法在颈椎病临床治疗方面取得了良好的疗效。有学者进一步提出^[6-8]，“椎骨错缝”是颈椎病临床发病的主要病理环节之一,同时也是手法临床干预靶点。本研究将三维有限元分析技术引用到这一研究领域,创建颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型,旨在通过模型反映错缝椎骨关节三维空间的位置异常和临床

发病机制的研究。本文着重介绍颈椎“椎骨错缝”的三维有限元模型创建的方法。

1 资料与方法

1.1 研究对象与设备 参照颈椎病诊断标准^[9],选门诊颈型颈椎病患者 1 例,男,28 岁,身高 176 cm,体重 69 kg。经动静态触诊和 X 线检查确诊其 C₅ 发生后仰式错缝(错位),同时排除颈椎创伤、骨折、结核、肿瘤等异常。飞利浦 16 排螺旋 CT 机,由上海中医药大学附属曙光医院放射科提供。三维重建软件 ITK-SNAP、网格化软件 NETGEN 及有限元形变分析软件均由上海交通大学软件学院提供。

1.2 步骤和方法

1.2.1 CT 数据扫描 采用飞利浦 16 排螺旋 CT 机

基金项目:1. 国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号:2007CB512701);2. 中医药行业科研专项(编号:7-17);3. 国家中药管理局重点专病专科(编号:09J1X1L116K110)

通讯作者:詹红生 E-mail:shgysjs@139.com

对已经选定的研究对象进行螺旋扫描及断层图像处理。扫描时受试者采取仰卧位,尽量保持扫描断面与身体长轴的垂直。扫描参数如下:层厚 0.75 mm,球管电流与电压 200 Ma/120 kv,扫描范围自 C₁ 椎体上方 2 mm 始至 C₇ 椎体下方 2 mm 止。为了获得高清和能够很好地反映关节组织间的位置关系,在 CT 工作站中,通过调整图像的灰度、增加对比度等对图像观察细节进行调整,并将其保存为 DICOM 格式,刻录为光盘保存。

1.2.2 椎体和椎间盘图像分割 将 DICOM 格式的 CT 图像数据导入三维重建软件 ITK-SNAP。应用 ITK-SNAP,分割组织像素点:骨节,灰度远高于软组织,把灰度>200 的像素点抽取出来;椎间盘,CT 抽取数据图像方法,填充骨节之间的缝隙(软件界面及原理见图 1)。

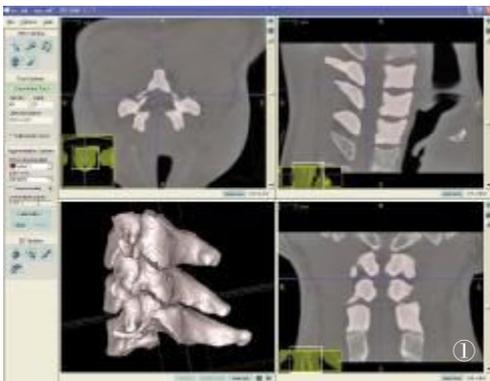


图 1 ITK-SNAP 软件图像分割使用界面图
Fig.1 The figure of ITK-SNAP software interface

1.2.3 三角形表面网格重建 应用 ITK-SNAP 软件运用 Marching Cube 法进行三角形表面网格重建,以便于数据的可视化及后继的处理。

1.2.4 四面体网格模型建立 使用 NETGEN 软件将三角表面网格面模型,转化为四面体网格体模型,具体原理和软件使用见图 2。



图 2 NETGEN 软件将四面体网格转化成四面体网格原理图
Fig.2 NETGEN software transform trihedron mesh to tetrahedron mesh

1.2.5 结构材料学参数测定 参照文献[10-11]。

2 结果

2.1 X 线片获得与处理 对纳入研究患者行问诊、触诊资料收集后,按实验要求对其行颈椎 X 线检查,结果提示 C₅ 椎体后仰式错缝,且与触诊结果相符(见图 3)。触压痛点:C₅ 棘突压痛阳性,C₅₋₆ 棘突间压痛阳性,右侧 C₅₋₆ 关节突关节压痛阳性。动态触诊:C₅₋₆ 椎间向后松动度异常,C₅₋₆ 椎间右旋松动度异常。



图 3 C₅ 椎体后仰式错缝
Fig.3 C₅ hypsokinesia-type semidislocation

2.2 CT 图像获得与处理 按照实验要求 CT 扫描后,在 CT 工作站中,通过调整图像灰度,增加对比度等对图像观察细节进行调整,得到 300 幅清晰的颈椎骨窗断层图像,并将其保存为 DICOM 格式,刻录光盘保存(见图 4)。

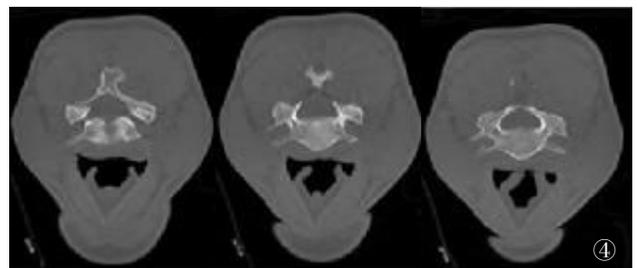


图 4 3 幅连续 CT 数据 DICOM 格式图示
Fig.4 Three DICOM picture of continuous CT data

2.3 CT 图像处理与颈椎椎体三维模型建立 将 DICOM 格式的图像(300 幅)数据读入三维重建软件 ITK-SNAP,在软件界面上操作分割出 C₄₋₆ 节段 DICOM 数据图像(45-192 层,共 148 幅),依据这些数据对错缝节段的 C₄₋₆ 椎体进行三维重建(见图 5)。

2.4 错缝节段三维空间位置异常判定 通过三维重建,应用有限元形变软件分析表明,参照相邻椎体序列,C₅ 椎体发生空间位置异常,空间位置变化是向下平移 0.9 mm,绕 X 轴顺时针旋转 4.5°,C₅ 椎体呈现后仰式错缝,与动静触诊检查及 X 线检查结果具有一致性(见图 6)。

2.5 椎间盘实体模型建立 基于 CT 抽取数据,采用图像方法,填充于椎间隙(见图 7)。



图 5 C₄₋₆ 椎体三维重建
Fig.5 C₄₋₆ three-dimensional reconstruction



图 6 C₅ 椎体后仰式错缝(黄色)
Fig.6 C₅ hysokinesis-type semidislocation

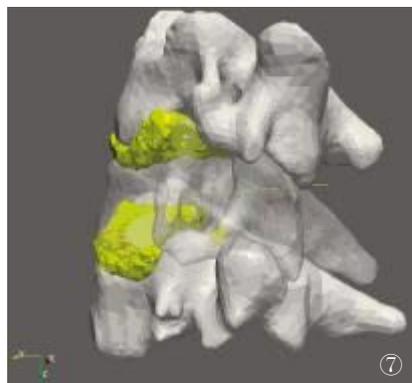


图 7 C₄₋₆ 椎体和椎间盘重建图(椎间盘如图中黄色所示)
Fig.7 C₄₋₆ vertebra and disc three-dimensional reconstruction

2.6 网格化 将 C₄、C₅、C₆ 椎体和椎间盘的三角表面网格数据模型导入 NETGEN 软件,将其进行网格划分,网格类型数量见表 1 和图 8-9。

2.7 结构材料学参数 依据参考文献^[10-11],弹性模量(Young's modulus)和泊松比(Poisson's ratio)等参数测定结果见表 2。

2.8 颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型与应用 通过以上各步操作,最终得到颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型(见图 10)。本模型可在三维空间任意旋转,并且能够模拟颈椎前屈、后伸、左右侧屈、左右旋转等活动,同时应用有限元形变分析软件程序可在

表 1 三维有限元模型的单元划分

Tab.1 Unit division of three dimensional finite element model

结构	单元类型	单元数目
C ₄ 椎体	四面体	12 988
C ₅ 椎体	四面体	23 026
C ₆ 椎体	四面体	13 484
髓核	四面体	4 058
纤维环	四面体	5 248

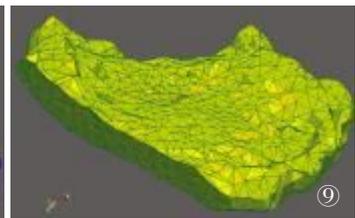
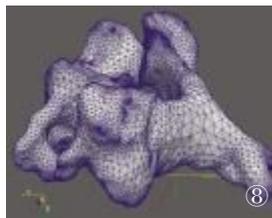


图 8 椎体网格化示意图 图 9 椎间盘网格图
Fig.8 The figure of vertebra meshing Fig.9 The figure of disc meshing

表 2 有限元模型的材料常数

Tab.2 Material constant of three dimensional finite element model

结构	单元类型	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	四面体	12 000	0.3
松质骨	四面体	100	0.2
椎间盘	四面体	500	0.3

本模型上实现虚拟关节矫正手法,矫正前后对照图(见图 11)。

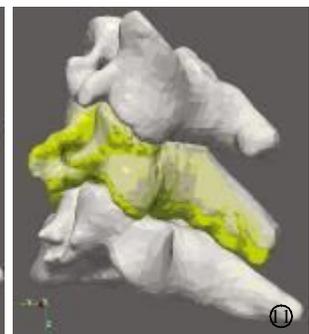
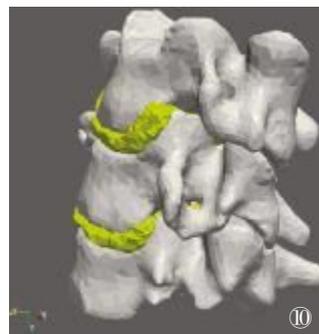


图 10 颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型 图 11 矫正前后 C₅ 椎体位置变化对比(黄色矫正前,白色矫正后)

Fig.10 Three-dimensional finite element model of vertebra semidislocation Fig.11 C₅ semidislocation change before and after treatment by manipulation (yellow-before treatment, white-after treatment)

3 讨论

3.1 三维有限元模型建立的准确性 本模型的建立首先选成年颈椎病患者(影像学检查和临床查体提示有颈椎“椎骨错缝”)行颈椎三维螺旋 CT 扫描,并将数据保存为 DICOM 格式图片,应用 CT 和 MRI 的 DICOM 图像的显示、分割工具 ITK-SNAP 软件,对颈椎 CT 数据进行分割,然后应用 ITK-SNAP 软件运用三维数据场等值面生成的经典算法 Marching

Cube 法^[12]对错缝节段(C₄₋₆)进行三角形表面网格重建椎,并在此基础上由 NETGEN 软件将三角表面网格面模型,转化为四面体网格体模型,旋转观察模型形态与颈椎解剖形态具有满意的相似性,如此充分保证了模型的几何近似。此外,本实验所建模型数据基于患者活体颈椎 CT 数据,且模型材料参数和模型的加载条件都是引鉴其他学者在颈椎有限元模型中的经典实验结果,因此,模型的有效性得到保证。

3.2 三维有限元模型的应用 以往对颈椎生物力学的研究模型大都是取自尸体标本^[13-15],将标本固定于各种加载装置上进行生物力学测试。毫无疑问,尽管这种研究模型解决了颈椎生物力学在体测试的难题,但是,由于模型取自尸体标本,标本组织大都经过试剂固定且失去生理活性^[16],从而给试验带来一定的误差,因此,这种研究模型与临床实际存有很大的差距。探求一种较为理想的颈椎生物力学研究模型一直是医学界的难题。

由于颈椎在几何形状上的不规则性和组成物质的非均匀性以及用人体做力学试验的不可能性,因此,随着计算机技术的飞速发展,三维有限元模型成为较为理想、对身体无任何破坏的颈椎生物力学研究分析工具。三维有限元分析技术在颈椎生物力学的研究领域也越来越广,在椎间盘的有限元分析、椎体的有限元分析、临床干预方法的有限元分析等方面都有着重要的应用。

三维有限元模型一方面初步探讨了颈椎“椎骨错缝”的建模思路与方法;另一方面,本模型可任意角度旋转,可清楚观察颈椎关节位置关系,与颈椎实体具有较高的仿真性,是较为理想的颈椎“椎骨错缝”的形态学观察模型;更重要的方面是,基于本模型可应用自编软件程序(上海交通大学软件学院)对错缝椎骨节段实施虚拟手法矫正,并能对矫正前后的椎骨关节和椎间盘做应力变化分析,从而为分析手法治疗颈椎病的生物力学机制提供了思路。

3.3 不足与展望 虽然本研究初步创建了颈椎“椎骨错缝”的三维有限元模型,但是,本模型构造只涉及了 C₄₋₆ 的颈椎关节和椎间盘,而对前后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带及颈椎周围的肌群、神经、血管都无所涉及。此外,椎间盘只能是采用数据图像

填充法来模拟,并没有实现椎间盘髓核和纤维环等真实结构的有限元模型。因此,从理想颈椎三维有限元模型角度讲,本研究还不是很成熟和完善,只能是探讨一种建模方法,且本方法需要进一步完善和改进;以上这些不足,将是今后研究中亟需重点解决的问题。

参考文献

- [1] 葛冰,金益,王耀.不同整骨手法治疗寰枢关节紊乱疗效比较.上海中医药杂志,2000,(11):30-31.
- [2] 黄荣,周学龙,麦穗.手法治疗寰枢关节半脱位及其伴随病症疗效观察.中医正骨,2002,14(8):10-11.
- [3] 赵金凤,张文献,张荣申,等.角度牵引、手法治疗寰枢关节错缝.颈腰痛杂志,2005,26(1):80-81.
- [4] 于高路,蒋文侃,王毅君.对抗剪切力扳法治疗下颈段小关节错缝 596 例.辽宁中医杂志,2002,29(7):429.
- [5] 周必伦.手法治疗腰椎小关节错缝 66 例疗效观察.新中医,2002,34(6):40.
- [6] 冯天有.中西医结合治疗软组织损伤.北京:人民卫生出版社,1977.36-37.
- [7] 田纪均.错骨缝与筋出槽治疗术.北京:人民军医出版社,2006.179-181.
- [8] 张明才,詹红生,石印玉,等.基于“骨错缝、筋出槽”诊治椎间盘病症.中国骨伤,2008,21(6):441-443.
- [9] 孙宇,陈琪福.第 2 届颈椎病专题座谈会纪要.中华外科杂志,1993,31(8):472-476.
- [10] Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA. Posterior complex contribution to the axial compressive and distraction behavior of the cervical spine. J Musculoskeletal Res, 1998, 2: 257-262.
- [11] Vijay, Weizeng K, Jung SH, et al. A combined finite element and optimization of lumbar mechanics without muscles. Spine, 1993, 18(11):1533-1541.
- [12] Lorensen WE, Cline HE. Marching cubes: a high-resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169.
- [13] Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, et al. Three-dimensional movements of the upper cervical spine. Spine, 1988, 13(7): 726-732.
- [14] Pospiech J, Stolke D, Wilke HJ, et al. Intradiscal pressure recordings in the cervical spine. Neurosurgery, 1999, 44(2): 379-384.
- [15] 周猛,李义凯,席卫文.颈椎牵引力与髓核内压力之间变化关系的简易分析模型.第一军医大学学报,2002,22(5):439.
- [16] 成海平,何光,刘正津.活性生物软组织力学特性研究的现状.国外医学:生物医学工程分册,1994,17:316-319.

(收稿日期:2010-01-08 本文编辑:连智华)