

基于 HyperMesh 建立颅底陷入合并寰枕融合畸形的三维有限元模型

梁 韬 孟春玲 尹一恒 刘广伟 余新光

【摘要】目的 探讨建立颅底陷入合并寰枕融合畸形的三维有限元模型的方法。**方法** 采集 1 例颅底陷入合并寰枕融合畸形患者的颅颈交界区的 CT 薄层扫描数据,利用 Mimics 软件对 CT 数据进行处理,生成三维几何表面模型,并导出点云;采用逆向工程软件 Imageware 处理点云数据,生成三维曲面;采用四面体与六面体混合分网的思路,利用 HyperMesh 对曲面模型先分块再分网,最后导出网格模型;将网格模型导入有限元软件 Abaqus,进行韧带添加、材料赋值、接触定义、边界约束等,得到寰枕融合畸形三维有限元模型。**结果** 建立的有限元模型包含 474 162 个单元和 235 524 个节点,外观逼真,几何相似性较好,可根据不同实验目的进行加载分析,对复杂载荷条件进行仿真计算。**结论** 利用 HyperMesh 等软件的前处理功能建立的颅底陷入合并寰枕融合三维有限元模型,可为颅颈交界区畸形的生物力学研究提供基础,可为上颈椎畸形有限元模型的建立提供参考。

【关键词】 颅底陷入症;寰枕融合畸形;三维有限元模型;HyperMesh

【文章编号】 1009-153X(2016)03-0155-03 **【文献标志码】** A **【中国图书资料分类号】** R 651.1'9

Establishment of a three-dimensional finite element model of basilar invagination and occipitalization of atlas on HyperMesh

LIANG Tao¹, MENG Chun-ling¹, YIN Yi-heng², LIU Guang-wei¹, YU Xin-guang². 1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Department of Neurosurgery, PLA General Hospital, Beijing 100853, China

【Abstract】 Objective To explore how to establish a three-dimensional finite element model of basilar invagination and occipitalization of atlas. **Methods** The CT data of craniovertebral junction in a typical patient with basilar invagination and occipitalization of atlas was collected. Mimics software was used to edit CT pictures and generate the three-dimensional geometric model of atlanto-occipital fusion corpus and axis surface. Then point cloud was exported. Reverse engineering software of Imageware was used to process point cloud data and generate three-dimensional curved surface. The surface model was blocked first and then meshed by Hypermesh software. The mesh model was finally exported by the method of mix-meshing in tetrahedrons and hexahedrons. The mesh model was imported into finite element software of Abaqus. Finite element model was established by adding ligaments, assigning material, defining contact and defining boundary. **Results** The finite element model of basilar invagination and occipitalization of atlas contained 474,162 elements and 235,524 nodes with good geometric similarity. **Conclusion** The three-dimensional finite element model of basilar invagination and occipitalization of atlas provides the basis for the research on craniovertebral junction malformation, and it can be used for reference of establishment of finite element model in upper cervical spine malformation.

【Key words】 Basilar invagination; Occipitalization of Atlas; Finite element analysis; Model; Hypermesh

颅底陷入合并寰枕融合是一种常见的先天性颅颈交界区畸形^[1],常导致严重的颅颈区不稳和延颈髓受压。该疾病的发病机制复杂,目前尚不明确,其发病后的颅颈部生物力学变化尚无文献报道。通过建立该疾病的有限元模型,可以对颅颈部的运动变化

过程和生物力学进行仿真和预测。本研究基于大型有限元前处理软件 HyperMesh,运用 CT 扫描技术、Mimics 软件以及逆向工程法,采用四面体与六面体混合分网的思路,探讨建立颅底陷入合并寰枕融合有限元模型的方法。

1 材料和方法

1.1 建模素材 采集 1 例颅底陷入合并寰枕融合病人颅颈交界部位的薄层扫描 CT 数据,该病人的寰椎前弓、后弓、侧块与枕骨完全融合。

1.2 实验设备与环境 ①64 排螺旋 CT 机(扫描条件:120 kV, 280 mA,层厚为 0.45 mm)。②高级计算站

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2016.03.008
基金项目:国家自然科学基金(81301274);中国博士后基金(2014M552653)
作者单位:100048 北京,北京工商大学材料与机械工程学院(梁韬、孟春玲、刘广伟);100853 北京,解放军总医院神经外科(尹一恒、余新光)
通讯作者:孟春玲,E-mail:284126444@qq.com

ThinkStation D20 (双 CPU 为英特尔六核处理器 X5680, 3.33 GHz; 内存为 96 G 1333 ECC; 显卡为 NVIDIA Q5000, 2.5 G; 操作系统为 64 位 Win7 系统)。③实验软件: Mimics 10.01, HyperMesh 12.0, Imageware 12.1, Abaqus 6.12。

1.3 建模方法

1.3.1 数据采集 采用 64 排螺旋 CT 机。患者取仰卧位, 调整扫描床, 使扫描区域位于扫描中心。自上而下进行螺旋轴位扫描。提取 CT 机上的原始数据, 以 DICOM 格式存储。

1.3.2 CT 图片处理 采用医学影像处理软件 Mimics, 读取 DICOM 格式的 CT 轴位断层图像, 如图 1 所示, 在分割模块 (Segmentation) 中, 利用阈值选取 (Thresholding) 分离出畸形骨性结构。进行 Draw (填补松质骨中的孔隙)、Erase (分离相粘连的 mark 区域)、Calculate 3D 等编辑处理, 得到对应位置的蒙罩 (mark), 如图 1 所示。保证病变椎体外轮廓的完整性的同时, 尽量减少灰度值差异导致的凹凸不平的表面。最后分离出局部的寰枕融合椎体和枢椎的三维几何表面模型。

观察三维图, 进一步修改椎体上异常凸起或者凹陷区域, 三维表面模型的质量将影响后续的曲面操作以及分网难易。

1.3.3 点云数据导出 对三维几何表面模型进行优化 (remesh) 和光滑处理 (smoothing), 得到表面比较光滑、网格质量较好的表面网格模型后, 生成各骨骼的外表面点云数据并保存。

1.3.4 曲面拟合 由于寰枕融合患者椎体病变, 外形无规则, 本研究选取骨性结构较为完整、病变特征较为明显的一半进行曲面拟合。将 Mimics 软件所生成的点云数据导入逆向建模软件 Imageware, 通过延伸、裁剪、连接等操作将各点云边界曲线进行封闭处理。将曲面间缝隙缝合, 得到骨骼结构整体外表面, 导出保存为 igs 格式文件。

1.3.5 网格划分 由于畸形骨骼结构较为复杂, 本实验采用四面体与六面体单元混合分网的思路。首先将 Mimics 生成的曲面几何模型导入 HyperMesh, 采用 toggle 命令修复不连续的面。将模型切割分块, 利用 solid map 对接触部分进行六面体单元 (C3D8R) 分网, 对其余部分采用 3D-tetramesh 分成四面体网格 (C3D4), 在六面体与四面体单元之间采取逐步过渡的思想, 使相应节点完全连接。其中, 横韧带与关节软骨也采用六面体单元。最后整体沿中面对称复制, 得到骨骼整体的网格模型, 如图 2 所示。

接触定义、边界约束等。

韧带添加: 寰枕融合的枕骨 (C0) 与寰椎 (C1) 之间的韧带在模型中不添加, 其余的黄韧带、齿凸尖韧带、十字纵向韧带、前纵韧带、寰枢关节囊韧带、覆膜、翼状韧带、寰枢副韧带采用一个或者多个非线性弹簧单元 (SPRING) 模拟 (图 3), 非线性的力-位移曲线则通过采用分段线性处理的方法。韧带相关参数见表 1^[2]。接触定义: 接触问题属高度边界非线性问题, 本模型重点考虑寰枢椎关节面以及齿凸表面的受力及相互作用。研究中对接触的模拟, 采用库仑摩擦定律, 设定接触面间摩擦系数^[3]。

表 1 韧带参数

韧带	Ff(N)	Fd(mm)	Stiffmax(N/mm)
前纵韧带	263	11.8	24.0
寰枢关节囊韧带	314	9.3	32.3
黄韧带	111	9.6	11.6
寰枢副韧带	18.24	3.967	5.112
覆膜	76	11.9	7.1
尖韧带	214	8.0	28.6
翼状韧带	357	14.1	21.2
枕枢副韧带	18.24	5.95	3.408
十字韧带纵向	436	12.5	19.0

边界约束: 枢椎 (C2) 下表面采取完全约束。力矩加载点位于枕骨中上部, 加载点与枕骨对称面耦合连接 (coupling)。

2 结果

在 Abaqus 中得到了寰枕融合畸形的三维有限元模型, 包含 474 162 个单元和 235 524 个节点, 单元类型包括 C3D8R、C3D8I、C3D4、C3D6、SPRINGA 等。三维有限元模型可根据不同实验目的进行加载分析, 得到运动变形情况以及内部应力应变参数等。本实验得到的有限元模型外观逼真, 几何相似性较好, 能对复杂载荷条件进行仿真计算。

图 4 所示为四种不同加载条件下的位移云图。

3 讨论

随着计算机技术的飞速发展, 三维有限元分析技术在生物力学研究中得到越来越多的应用。由于颈椎特殊的解剖结构及功能, 其有限元研究发展较晚, 早期的颈椎有限元模型几何结构粗糙, 材料属性也不明确。2004 年, Brodin 等^[4]建立包括横韧带、十字韧带、翼状韧带、齿状突尖韧带等较为完善的上颈椎有限元模型。之后, 随着计算机计算能力以及软

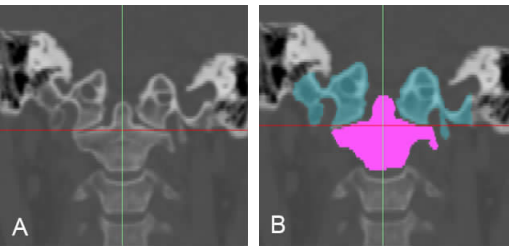


图 1 寰枕融合患者颈椎寰枕关节 Mimics 编辑前后 CT 影像

A. Mimics 编辑前; B. Mimics 编辑后

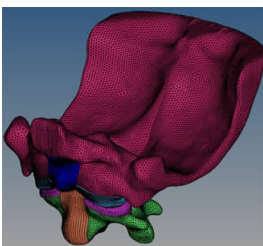


图 2 寰枕融合患者颈椎寰枕关节骨骼网格模型

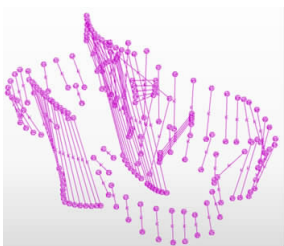


图 3 寰枕融合患者颈椎寰枕关节韧带单元

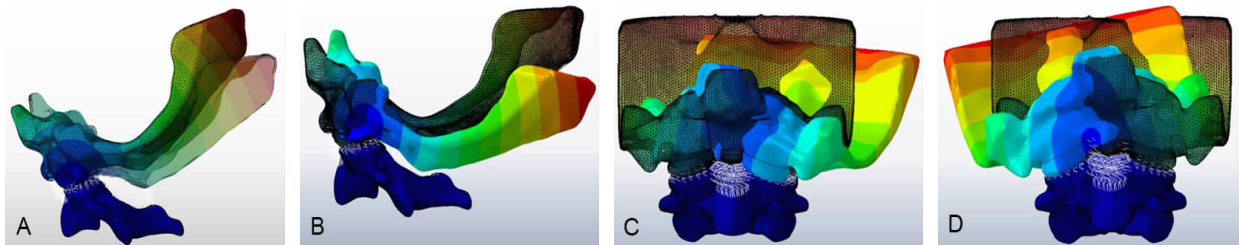


图 4 寰枕融合畸形前屈、后伸、旋转、侧弯位移云图

A. 前屈; B. 后伸; C. 旋转; D. 侧弯

件技术的进一步发展,近十年国内外对上颈椎有大量的有限元建模研究^[5-7],对正常的人体上颈椎建模分析已经比较成熟;而对于颅颈交界区畸形的有限元模型,上颈椎骨性结构变异大,国内外尚未有此方面的建模研究。对寰枕融合的生物力学特性研究也仅限于形态学的观察与测量^[1,8]。因此,建立颅底陷入合并寰枕融合畸形有限元模型,对相关的生物力学研究有着积极重要的意义。

我们前期通过改良正常的枕寰枢有限元模型,成功建立相对简单的寰枕融合模型的有限元模型^[9],对相关区域生物力学特性进行研究,但是对于模拟人体真实病变情况尚存不足。本研究采用颅底陷入合并寰枕融合病人的 CT 数据,分离出骨性结构进行有限元建模。在以往颈椎建模分析中,大部分采用边界适应性较强的四面体单元,边界接触比较粗糙^[10]。本研究是畸形骨性结构的建模,对于模型的分网有着较高的难度。通过前期的研究和建模经验,若模型全部分为四面体单元时,对于复杂的接触条件常伴随着计算不收敛,不能满足复杂载荷条件下的力学分析;而模型全部分为高密度的六面体单元,在曲率变化复杂的畸形表面又难于实现。因此,本研究利用 HyperMesh 强大的分网功能,采用四面体与六面体混合分网的思路,将整体模型中椎体骨性接触部位以及应力应变重点关注部位进行六面体分网,将其余的骨性融合畸形部分划分为高密度四面体,从而建成高精度的寰枕融合畸形有限元模型,

整体模型单元数达四十多万。在有限元分析中,分网能占到整体工作量 50% 左右^[11],所以采用混合分网的思路能大大提高建模效率,为后续的研究节约时间。

对畸形接触面的仿真建模是本研究的难点。通过前期试验,我们发现直接从 Mimics 导出表面数据建模的方法^[10],在本畸形模型并不适用,主要是关节面的变形引起表面十分不平整,不能满足进一步的加载计算。通过尝试后采用逆向工程方法,利用提取得到的点云对接触的表面进行曲面拟合,反复调整后得到完整的表面模型,既保证了外观轮廓特别是重点关注的寰枢外侧关节的相似性,又避免了不平整的表面影响计算。颅底陷入合并寰枕融合畸形时,寰枢外侧关节面角度变异较大^[1,12],利用 HyperMesh 等软件的前处理功能,可以在畸形骨性结构基础上进一步对寰枢外侧关节变异差异进行仿真,可调整关节面的倾斜角度接触参数等进行分析,为该区域的生物力学特性提供更多的动态结果分析。

目前,国内外尚无对颅底陷入合并寰枕融合建模的有限元研究或者体外生物力学实验,缺乏相关的几何形态及力学分析,而本研究属于探索性建模,在尽可能真实模拟此区域的解剖形态的基础上建立有限元模型,虽然具有一定局限性,但基本反应了该类疾病的整体解剖属性,包括寰枕融合、颅底陷入、寰枢椎脱位等,值得进一步研究。

(下转第 160 页)

水的 Chiari 畸形 I 型的对照研究,无法确定哪种手术方式更有效。此外,该疾病的发病率并不高,各研究纳入样本量往往较小,而且个体的症状差异较大,不利于系统细致的研究不同手术方式的治疗优势;所以需要多个中心联合研究。

【参考文献】

[1] Di Rocco C, Frassanito P, Massimi L, *et al.* Hydrocephalus and Chiari type I malformation [J]. Childs Nerv Syst, 2011, 27(10): 1653-1664.

[2] Deng XF, Wu L, Yang C, *et al.* Surgical treatment of Chiari I malformation with ventricular dilation [J]. Neurol Med Chir (Tokyo), 2013, 53(12): 847-852.

[3] 王晓澍,惠旭辉,杨咏波,等. Chiari I 畸形合并脑积水的手术治疗(附 33 例报告)[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2005, 31: 119-121.

[4] 魏新亭,保建基,宋来君,等. 小脑扁桃体下疝畸形合并脑积水 15 例治疗体会[J]. 郑州大学学报(医学版), 2007, 42(40): 770-771.

[5] Levy WJ, Mason L, Hahn JF. Chiari malformation presenting in adults: a surgical experience in 127 cases [J]. Neurosurgery, 1983, 12(4): 377-390.

[6] Arnautovic A, Splavski B, Boop FA, *et al.* Pediatric and adult Chiari malformation type I surgical series 1965~2013: a review of demographics, operative treatment, and outcomes [J]. J Neurosurg Pediatr, 2015, 15(2): 161-177.

[7] Meadows J, Guarnieri M, Miller K, *et al.* Type I Chiari malformation: a review of the literature [J]. Neurosurgery, 2001, 11: 220-229.

[8] Massimi L, Pravata E, Tamburrini G, *et al.* Endoscopic third ventriculostomy for the management of Chiari I and related hydrocephalus: outcome and pathogenetic implications [J]. Neurosurgery, 2011, 68(4): 950-956.

[9] Galarza M, Martinez-Lage JF, Ham S, *et al.* Cerebral anomalies and Chiari type I malformation [J]. Pediatr Neurosurg, 2010, 46(6): 442-449.

[10] 文利, 和华元. 脑室腹腔分流治疗小脑扁桃体下疝畸形合并脑积水体会[J]. 西南军医, 2014, 16: 277-278.

(2015-10-08 收稿, 2015-11-30 修回)

(上接第 157 页)

【参考文献】

[1] 刘策,周定标,余新光,等. 寰枕融合的形态生物力学分析[J]. 中国临床神经外科杂志, 2007, 12: 1-3.

[2] Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA. Biomechanics of the cervical spine--Part2: Cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2001, 16(1): 1-27.

[3] Srirangam K, Narayan Y, Frank AP. Finite element modeling approaches of human cervical spine facet joint capsule [J]. J Biomech, 1998, 31: 371-376.

[4] Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(4): 376-385.

[5] 柳超,田纪伟,王雷,等. 寰枢椎复合体三维有限元模型的建立与分析[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(19): 1970-1976.

[6] 杨生,孟春玲,王鹏,等. 枕寰枢复合体有限元模型的建模研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 268-272.

[7] Devries Watson NA, Gandhi AA, Fredericks DC, *et al.* Sheep cervical spine biomechanics: a finite element study [J]. Iowa Orthop J, 2014, 34: 137-143.

[8] 朱忠培,王利民,刘屹林,等. 寰枕融合[J]. 医药论坛杂志, 2012, 33(2): F0003-F0004.

[9] 尹一恒,余新光,王鹏,等. 寰枕融合下的颅颈交界区有限元生物力学分析[J]. 中华外科杂志, 2015, 53(3): 211-214.

[10] 姜广宗,李学锋,聂林,等. 利用 MIMICS 和 ABAQUS 建立正常人颈椎的三维有限元模型[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(11): 1114-1120.

[11] 张荣. 四面体与六面体网格特征比较[J]. 企业技术开发, 2012, 31(23): 101-102.

[12] 何宏伟,王泽恩,赵慧毅,等. 解剖学和影像学观察寰枢关节及相关结构的对比研究[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2010, 18(9): 1-3.

(2015-10-01 收稿, 2015-12-10 修回)