

以螺旋CT数据建立的颅底三维有限元模型★

刘文芳¹, 王菲¹, 宋哲¹, 任国山²

Establishment of a three-dimensional finite element model of skull base using spiral CT image

Liu Wen-fang¹, Wang Fei¹, Song Zhe¹, Ren Guo-shan²

¹Department of Surgery, Cangzhou Medical College, Cangzhou 061001, Hebei Province, China; ²Department of Anatomy, Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017, Hebei Province, China

Liu Wen-fang★, Master, Attending physician, Lecturer, Department of Surgery, Cangzhou Medical College, Cangzhou 061001, Hebei Province, China
dancing_liu@126.com

Correspondence to: Ren Guo-shan, Professor, Master's supervisor, Department of Anatomy, Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017, Hebei Province, China

Received: 2010-08-30
Accepted: 2010-10-19

¹沧州医学高等专科学校外科学教研室, 河北省沧州市061001; ²河北医科大学解剖教研室, 河北省石家庄市050017

刘文芳★, 女, 1976年生, 河北省沧州市人, 汉族, 2010年河北医科大学毕业, 硕士, 主治医师, 讲师, 主要从事外科学教学与临床研究。
dancing_liu@126.com

通讯作者: 任国山, 教授, 硕士生导师, 河北医科大学解剖教研室, 河北省石家庄市050017

中图分类号: R318
文献标识码: A
文章编号: 1673-8225(2010)52-09726-04

收稿日期: 2010-08-30
修回日期: 2010-10-19
(20100506013/G·A)

Abstract

BACKGROUND: In recent years, a large number of biomechanical experiments have conducted to attempt to explain the correlation of craniocerebral injury with stress size and injury site. However, studies on skull fracture cause mainly focus on direct violence, and very little is known about the stress distributions in the skull exposed to indirect violence.

OBJECTIVE: Using spiral CT data, three-dimensional reconstruction software, and finite element analysis software, to establish a three-dimensional finite element model of the skull in the ordinary PC.

METHODS: Normal adult women were selected, free of head or neck injury, surgery or other history of disease. X-ray routine examination was performed to exclude organic disease, followed by head spiral CT TLC scanning. Image data were input into medical image and 3D reconstruction software MIMICS to establish the three-dimensional visualized model of the skull. The simplified model was optimized and introduced to finite element analysis software ANSYS 10.0 to establish three-dimensional finite element model of the skull.

RESULTS AND CONCLUSION: The entity model of the skull base was composed of frontal bone, sphenoid, ethmoid, temporal bone and occipital bone. Since the adults' sutures are closed, the skull is viewed as a whole. The entity model was meshed to create a 3D finite element model which consisted of 51 053 units and 80 273 nodes. The established finite element model of the skull base is verisimilar geometrically, which can be used in the biomechanic research.

Liu WF, Wang F, Song Z, Ren GS. Establishment of a three-dimensional finite element model of skull base using spiral CT image. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(52): 9726-9729.
[http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

摘要

背景: 近年来国内外学者进行了大量生物力学实验研究, 试图解释颅脑损伤的发生过程和受力大小与损伤部位的相关性。但是目前针对颅底骨折原因的研究主要是直接暴力, 对于间接暴力作用于颅底后颅底的应力分布情况尚无报道。

目的: 利用螺旋CT数据、三维重建软件及有限元分析软件, 在普通PC机建立颅底三维有限元模型。

方法: 选择正常成年女性作为建模对象, 无头颈部损伤、手术及其他病史, CT扫描前进行X射线常规检查排除器质性病变。头部螺旋CT薄层扫描后, 将图像数据输入医用图像与三维重建软件MIMICS中, 建立颅底的三维可视化模型。将该模型简化优化后, 导入有限元分析软件ANSYS 10.0中, 建立颅底的三维有限元模型。

结果与结论: 建立了由额骨、蝶骨、筛骨、颞骨、枕骨等共同组成的颅底实体模型, 由于成年人骨缝闭合, 所以将其视为一个整体。对实体模型划分网格, 得到颅底的三维有限元模型, 共有51 053个单元, 80 273个节点。提示所建立的颅底有限元模型外形逼真, 几何相似性好, 可以用来进行颅底骨折的生物力学研究。

关键词: 颅底; 三维重建; CT; 有限元; 间接暴力; 颅底骨折

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.52.010

刘文芳, 王菲, 宋哲, 任国山. 以螺旋CT数据建立的颅底三维有限元模型[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(52):9726-9729. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

颅底骨折是神经外科常见的损伤之一, 常见原因一是直接暴力作用于颅顶时骨折线延长到颅底, 二是间接暴力经脊柱传导到颅底, 与其他部位骨折相比, 影像学资料对颅底骨折的诊断价值很低, 临床诊断颅底骨折主要依据“熊猫眼”征、脑脊液漏等临床表现。近年来, 在生物力学领域, 以有限元分析为代表的仿真实验提高了生物力学实验的可重复性和精确性, 并降低了成本^[1]。国内外学者进行了大量生物力学实验研究, 试图解释颅脑损伤的发生过程与受力大小和损伤部位的相关性^[2-11]。但是, 就颅底骨折的原因

目前研究的主要是直接暴力, 对间接暴力作用于颅底后, 在颅底的应力分布情况, 目前尚无报道。本文的目的是探索基于螺旋CT图像, 并利用逆向工程软件建立符合人颅底解剖结构有限元模型的方法, 为颅底骨折的生物力学研究提供有效的虚拟实验工具。

1 对象和方法

设计: 单一样本重复实验。

时间及地点: 于2008-11/2010-03在河北医科大学解剖教研室的图像分析室完成。

对象: 选择1名健康成年女性志愿者作为建模对象, 20岁, 无头颈部损伤、手术及其他

病史, CT扫描前进行X射线常规检查排除器质性疾病, 对试验方案知情同意, 且得到医院伦理道德委员会批准。

主要设备及应用软件:

主要设备及应用软件	来源
螺旋CT (GE MEDICAL SYST EMS/Light Speed 16)	河北医科大学第二医院影像科提供
家庭用PC机(CPU: 2.4GHz×2, 内存: 2GB, Windows XP操作系统)	-
MIMICS 10.01 医用图像与三维重建软件	Materialise 公司, 比利时
ANSYS 10.0 有限元分析软件	ANSYS 公司, 美国

方法:

CT扫描图像: 志愿者取仰卧位, 眶耳平面与水平面垂直, 头部固定, 扫描范围自眉弓处始, 至枕骨下缘止。螺旋扫描参数为: 120 kV, 251.40 mA, 螺旋层厚 0.625 mm, 床进速度 1 mm/s。最终得到 145 幅二维扫描断层图像; 分辨率为 512×512 像素。数据输出并刻盘保存成 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 格式。DICOM 是美国国家电气制造商协会制定的医学图像存储与通讯的标准格式, 其图像要比从 CT 胶片扫描获得的图像清洁、方便又不会引起因人为处理所造成的坐标误差^[12]。

建立颅底的三维可视化模型: 将螺旋CT图像以DICOM格式导入医用图像与三维重建软件MIMICS 10.01中, 利用软件自带的阈值设定工具提取轮廓, 界定阈值在 226~3 071 Hu, 形成蒙面。利用区域增长工具选择热区, 逐层删除位于其他部位具有和骨骼相同灰度的组织处的标记, 并手工补全骨骼中未被标记的部分, 经3D计算生成颅底的三维可视化模型。

对颅底三维可视化模型的简化和优化: 为减小计算量, 将前面生成的颅底三维可视化模型简化, 去掉面颅部分, 仅保留颅底。之后, 利用MIMICS软件中FEA模块中的网格重划功能优化面网格。将简化、优化后的模型直接输出为ANSYS可识别的格式(.lis)。

建立颅底的有限元模型: 将生成的三维可视化模型导入有限元分析软件ANSYS 10.0中, 在前处理模块中将已经导入的面网格模型划分成体网格, 保存为.db格式。定义单元类型为三维10节点四面体结构实体(Solid92), 根据文献报道中模型材料参数确定本实验颅底相应参数为: 杨氏模量 $E=8\ 000\ \text{MPa}$, 泊松比为0.22, 密度为 $1\ 800\ \text{kg/m}^3$ 。应用ANSYS中智能尺寸网格划分功能进行网格划分, 局部部位实行细化进行控制, 最终得到颅底的三维有限元模型, 共有51 053个单元, 80 273个节点。

主要观察指标: 在 ANSYS Workbench模块中利用

测量工具测量颅底有限元模型的各项几何参数, 与正常人体解剖参数比较。

2 结果

2.1 建立了颅底的三维可视化数字模型 该模型外形逼真, 前、中、后3个颅窝自前向后由浅及深呈阶梯状排列, 可任意进行旋转、平移、缩放, 较好的显示了颅底的结构, 骨面较平整光滑, 无组织缺失, 可清晰分辨鸡冠及两侧为筛骨筛板、视神经管、垂体窝、鞍背、眶上裂、圆孔、破裂孔、卵圆孔和棘孔、枕骨大孔、斜坡、枕内隆突、横窦沟和乙状窦沟、颈静脉孔及内耳门等结构, 符合人体正常解剖特性, 见图1~4。

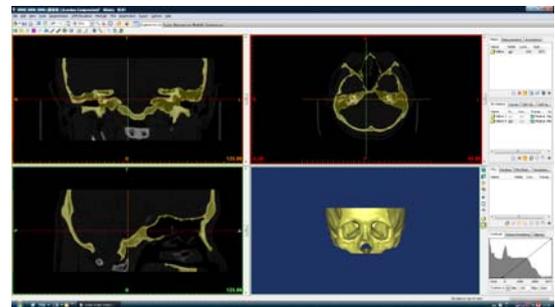


Figure 1 3D model generated from MIMICS
图1 MIMICS中生成的3D模型

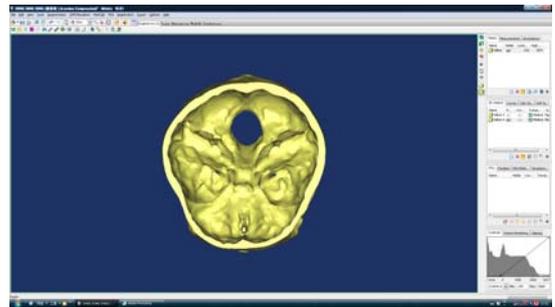


Figure 2 Internal surface of the base of the skull
图2 颅底内面观

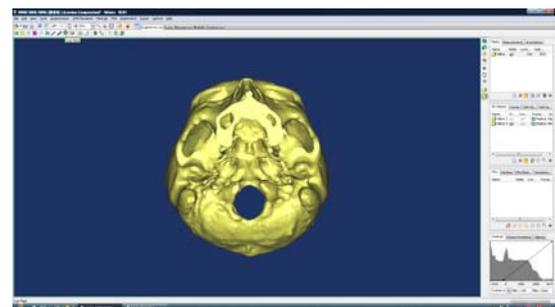


Figure 3 External surface of the base of the skull
图3 颅底外面观

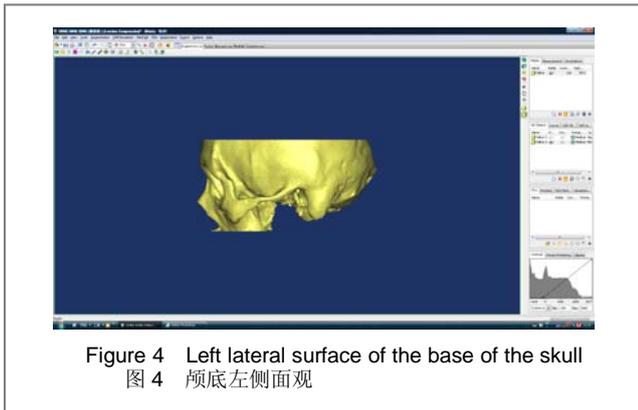


Figure 4 Left lateral surface of the base of the skull
图4 颅底左侧面观

2.2 建立了颅底的三维有限元模型 该模型是由额骨、蝶骨、筛骨、颞骨、枕骨等共同组成的颅底的实体模型, 由于成年人骨缝闭合, 所以将其视为一个整体。对实体模型划分网格, 得到颅底的三维有限元模型, 共有51 053个单元, 80 273个节点。模型网格划分合理, 解剖结构清晰, 见图5, 经验证符合三维有限元模型的要求, 适合作为进一步生物力学分析的虚拟标本。

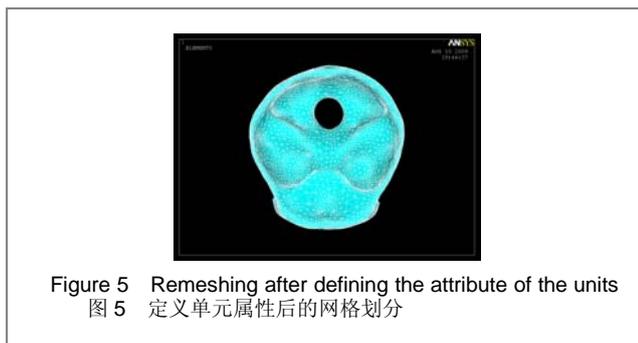


Figure 5 Remeshing after defining the attribute of the units
图5 定义单元属性后的网格划分

3 讨论

20世纪70年代以来, CT、MRI等医学成像技术的临床应用, 使得医学诊断和治疗技术取得了极大的发展。但是, 二维断层图像只能表达某一截面的解剖信息, 临床医生凭借这些图像信息进行诊断治疗时需要具有很好的空间想象能力, 才能在脑海中构建直观的医学三维模型。为了提高医疗诊断和治疗规划的准确性与科学性, 医学图像三维重建技术越来越得到临床医生的广泛研究和应用, 并成为了一个研究热点^[13]。

目前, 有许多CT机也具备三维重建功能, 重建结果也很清晰, 并能指导手术, 但它只能在CT机的工作站上进行, 不能广泛用于临床教学及基层医疗单位。本实验应用MIMICS软件, 很方便的在普通PC机上对连续的二维图像进行结构识别和分割, 且能实时地进行三维重建。所建的三维可视化模型可以随意放大、缩小, 可以沿任意方位旋转, 也可以任意分割。本实验建立的颅底三维可视化模型, 能清晰显示颅底全貌, 提供了二维图像不能提供的信息, 为临床诊断提供了可靠的解剖资料,

也为今后的手术计划、模拟, 以及开发虚拟手术系统提供数据模型基础。

随着计算机技术的发展, 特别是有限元分析软件的不断升级换代, 近年来三维有限元方法在生物力学研究领域得到广泛的应用。有限元方法应用的范围与数年前比较, 涉及牙齿、锁骨、脊柱、髋关节、骨盆、膝关节、踝关节、腕关节、假肢、软骨等领域^[14-27], 从线性分析到非线性分析, 从静态分析发展到动态分析, 范围很广。

颅脑损伤是临床医学和法医学涉及的损伤中都是非常重要的部分, 颅底骨折又是颅脑损伤的重要部分^[28], 临床上将其笼统地分为颅前窝骨折, 颅中窝骨折和颅后窝骨折^[29], 且诊断和定位主要依据临床表现, X射线和CT的阳性率较低^[30]。建立人颅底的三维有限元模型, 为颅底骨折的生物力学研究提供有效的虚拟实验工具。

本文中有限元模型的特点: ①根据正常人体的头颅CT图像建模。模型结构复杂, 包括颅前窝、颅中窝、颅后窝, 相比以前的模型更加接近真实状态。②有限元方法作为一种计算方法, 其结果依赖于单元数目、类型以及分析中所做的假设。本文的有限元模型高度模拟颅底结构与材料特性, 结构完整, 空间结构的测量准确度高, 单元划分精细, 共有51 053个单元, 80 273个节点, 远远超过了以前所建立的模型的单元和节点数。③建成的模型可以任意旋转观察, 模型形态与颅底的解剖形态具有满意的相似性。④软件是有限元技术的生命线, 作者所采用的ANSYS软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件, 它在该领域中, 第一个通过ISO9001质量认证, 能与多数CAD软件(如Pro/Engineer、Auto CAD等)接口, 实现数据的共享和交换。

从结果来看, 本文运用有限元方法建立的颅底三维有限元模型, 高度模拟颅底结构与材料的特性, 结构完整, 空间结构的测量准确度高, 单元划分精细, 共有51 053个单元, 80 273个节点。本模型可进行任意旋转观察, 模型形态与颅底的解剖形态具有满意的相似性, 可任意切割, 并可通过调整模型几何及材料参数以模拟不同临床与实验状态。

本文综合应用多个软件, 充分利用专业医学影像三维重建软件和有限元分析软件的强大功能, 简化了以往研究中对CT断层图像处理 and 转化以提取轮廓线来建模的繁琐过程, 最大程度减少了主观因素带来的误差, 简化了模型的建立过程, 而且得到的模型具有很好的几何相似性, 这样就为后面进行进一步的研究提供了有力的基础。整个过程一气呵成, 提高了工作效率。在今后的研究中, 还可以利用建立的三维可视化模型进行颅内手术入路的设计; 如果加大工作站的内存, 增加其计算能力, 还可以建立更加精细化的有限元模型, 使生物力

学分析的结果更加准确。

4 参考文献

- [1] Chen ZB, Wan L. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2007;11(31): 6265-6267.
陈灼彬, 万磊.医学有限元的建模方法[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,11(31): 6265-6267.
- [2] Pesce Delfino V, De Marzo C, Perte A, et al. Biomechanical simulation model of the developmental morphology of the human skull. Further observations on the model construction. Boll Soc Ital Biol Sper. 1981;57(20):2011.
- [3] Jiao DB, Wu WZ, Yang GT. Zhongguo Shengwu Yixue Gongcheng Xuebao. 1992;11(3):141-149.
焦大宾, 吴文周, 杨桂通. 人头颅受撞击作用的力学分析[J].中国生物医学工程学报, 1992,11(3):141-149.
- [4] Ruan JS, Khalil T, King AL. Dynamic response of the human head to impact by three-dimensional finite element analysis. Biomech Eng. 1994;116(I):44-50.
- [5] Song JL, Jiang YP, Wang ZG, et al. Shiyong Linchuang Kangfu. 1998;13(3): 277-282.
宋锦良, 姜燕平, 王正国, 等. 颅脑受撞击时的动态光弹性应力分析[J].实验力学,1998,13(3):277-282.
- [6] Willinger R, Taleb L, Kopp CM. Modal and temporal analysis of head mathematical models. Neurotrauma. 1995;12: 743-754.
- [7] Bandak FA, Vander-Vorst MJ, Stuhmiller LM, et al. An imaging-based computational and experimental study of skull fracture:finite element model development. Neurotrauma. 1995; 12: 679-688.
- [8] Krbabel G, Appel H. Development of a finite element model of the human skull. Neurotrauma. 1995;12(4):735-742.
- [9] Remmler D, Olson L, Ekstrom R, et al. Pre-surgical CT/FEA for craniofacial distraction:1Mehtodology,development,and validation of the cranial finite element model. Med Eng Phys. 1998;20(8): 607.
- [10] Bo B, Zhou SX, Bai XG, et al. Zhonghua Chuangshang Zazhi. 2000; 16(12):716-719.
薄斌, 周树夏, 白西刚, 等.用模态分析法建立人颅颌面骨骼系统动力学模型[J]. 中华创伤杂志,2000, 16(12):716-719.
- [11] Ran SJ, He P, Lu JP, et al. Zhongguo Shengwu Yixue Gongcheng Xuebao. 2007;26(1):99-104.
阮世捷, 何培, 卢俊鹏, 等.基于有限元法的人类头部损伤生物力学的模拟分析[J].中国生物医学工程学报, 2007,26(1):99-104.
- [12] Ma RY, Tie Y, Xue WD, et al. Yixue Shengwu Lixue. 2004;19(3): 180-183.
马如宇, 铁瑛, 薛文东, 等.基于螺旋CT构建人体骨盆三维有限元模型[J].医学生物力学,2004,19(3):180-183.
- [13] Lin XM, Pei JG, Niu G, et al. Changchun Gongye Daxue Xuebao: Ziran Kexueban. 2005;26(3):225-228.
林晓梅, 裴建国, 牛刚, 等.医学图像三维重建方法的研究和实现[J].长春工业大学学报: 自然科学版,2005,26(3):225-228.
- [14] Zhang CB, Ma XX, Zhang SF, et al. Shiyong Kouqiang Yixue Zazhi. 2003;19(2):103-106.
张春宝, 马轩祥, 张少峰, 等.颌骨内种植体植入牙槽骨吸收的中切牙的有限元应力分析[J]. 实用口腔医学杂志, 2003,19(2):103-106.
- [15] Yang ZY, Cheng LM, Tu X, et al. Dier Junyi Daxue Xuebao. 2008;29(11):1316-1319.
杨志勇, 程黎明, 涂熙, 等.颌骨三维有限元模型的建立及生物力学分析[J].第二军医大学学报, 2008,29(11):1316-1319.
- [16] Li FY. Zhongguo Youxiu Shuoshi Xuewei Lunwen Quanwen Shujuku. 2008.
李芳燕. 基于三维有限元模型的脊柱生物力学特性研究[D].中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2008.
- [17] Duan LQ. Zhongguo Youxiu Shuoshi Xuewei Lunwen Quanwen Shujuku. 2007.
段丽群.正常儿童髋关节三维有限元模型的建立及初步生物力学分析[D].中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2007.
- [18] Cao ZY. Zhongguo Youxiu Shuoshi Xuewei Lunwen Quanwen Shujuku. 2009.
曹振羽.有限元方法在骨盆骨折生物力学研究中的应用[D].中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2009.
- [19] Wu YJ. Zhongguo Youxiu Shuoshi Xuewei Lunwen Quanwen Shujuku. 2010.
吴彦杰.膝关节有限元模型的建立及交叉韧带应力分布的研究[D].中
- 国优秀硕士学位论文全文数据库, 2010.
- [20] Li G, Gil J, Kanamori A. A validated three-dimensional computational model of a human knee joint. Biomech Eng.1999; 121:657-662.
- [21] Wang X, Ma X, Tao K, et al. Zhongguo Shengwu Yixue Gongcheng Xuebao. 2008;27(2): 287-292.
王旭, 马昕, 陶凯, 等.足踝有限元模型的建立与初步临床应用[J].中国生物医学工程学报, 2008,27(2): 287-292.
- [22] Beaugonin M, Haug E, Cesari D. Improvement of numerical ankle/foot model:modeling of deformable bone. 41st Stapp Car Crash Conference Proceedings. 1997:225-237.
- [23] Moojen TM, Snel JG, Ritt MJ, et al. In vivo analysis of carpal kinematics and comparative review of the literature. J Hand Surg. 2003;28:81-87.
- [24] Jia XH, Zhang M, Lee WCC. Load transfer mechanics between trans-tibial prosthetic socket and residual limb dynamic effects. Biomech. 2004;37:1371-1377.
- [25] Zeng YS. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2008;12(35):6911-6914.
曾育山.假肢接受腔界面应力的有限元分析[J].中国组织工程研究与临床康复, 2008,12(35):6911-6914.
- [26] Lai Q, Cao XJ. Zhongguo Kangfu Lilun yu Shijian. 2010;16 (1) : 40-41.
赖卿,曹学军.生物力学用于假肢性能评价的研究进展[J].中国康复理论与实践,2010,16 (1) :40-41.
- [27] Tian YY. Zhongguo Youxiu Shuoshi Xuewei Lunwen Quanwen Shujuku. 2010.
田有勇.股骨髁有限元模型的建立及表面软骨不同切除后髌部力学变化的有限元分析[D].中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2010.
- [28] Man FY, Wang ZC, Qu YH, et al. Zhongguo CT he MRI Zazhi. 2004;2(1):8-10.
满凤媛, 王振常, 曲永惠, 等.颅底骨折的高分辨CT诊断[J].中国CT和MRI杂志, 2004,2(1):8-10.
- [29] Yu CX, Lei GD, Wan B, et al. Shiyong Linchuang Yixue. 2006;7(3): 103-105.
俞成叙, 雷冠东, 万冰, 等.127例颅底骨折的治疗与分型[J].实用临床医学,2006,7(3):103-105.
- [30] Liu JY, Zhao ST. Dangdai Yixue. 2009;15(19):31-32.
刘金有, 赵顺廷. 颅底骨折的影像学诊断进展[J].当代医学, 2009, 15(19):31-32.

来自本文课题的更多信息一

作者贡献: 实验设计主要由第一、四作者完成, 实验实施、评估由第一、二、三作者完成, 均经过正规培训, 未采用盲法评估。

致谢: 感谢河北医科大学第二医院影像科提供影像学资料, 感谢河北医科大学解剖教研室全体老师的无私帮助。

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。

伦理批准: 志愿者对试验方案知情同意, 且得到医院伦理道德委员会批准。

本文创新性: 检索中国期刊全文数据库及 Pubmed 数据库 2000/2010 的相关文献, 近年来国内外学者进行了大量生物力学实验研究, 试图解释颅脑损伤的发生过程、受力大小与损伤部位的相关性。但是目前针对颅底骨折原因的研究主要是直接暴力, 对于间接暴力作用于颅底后颅底的应力分布情况目前尚无报道。文章的创新性在于利用 CT 图像和计算机软件建立了完整颅底的有限元模型, 经验证符合三维有限元模型的要求, 适合作为进一步生物力学分析的虚拟标本。