

成年猕猴 C₀-T₁ 全颈椎有限元模型的建立及有效性验证<https://doi.org/10.12307/2021.292>

投稿日期: 2020-07-24

送审日期: 2020-08-18

采用日期: 2020-10-16

在线日期: 2021-04-02

中图分类号:

R459.9; R318; Q95-3

文章编号:

2095-4344(2021)35-05632-06

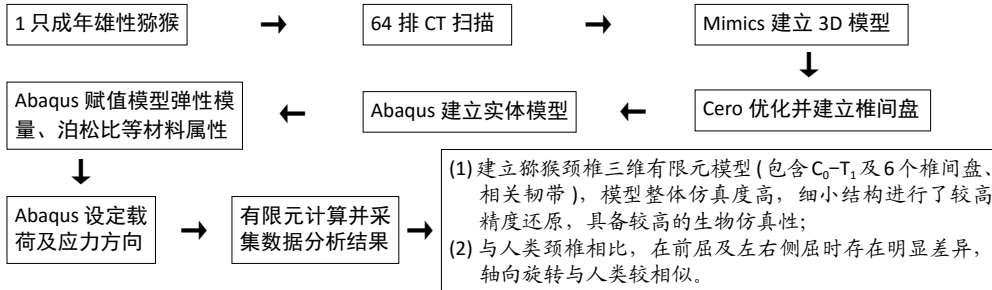
文献标识码: B

王星^{1,2}, 徐雪彬², 张少杰^{1,2}, 郑秉武³, 杨喜², 王超群⁴, 栗平⁵, 马渊⁶, 李琨², 陈杰², 李筱贺², 史君⁷, 李志军^{1,2}

文章快速阅读:

文章亮点一

△猕猴和人类一样具有颈椎特有结构“钩椎关节”, 因此可作为人类颈椎造模的最佳选择。
 △首次将全颈椎薄层 CT 的体内实验与皮质骨材料特性的体外实验数据相结合, 成功建立成年雄性猕猴全颈椎有限元模型并评估其活动度及应力应变特征, 对颈椎的细微结构进行了还原。利用此模型可进行猕猴颈椎的虚拟仿真, 为后期“钩椎关节”的深入研究提供了模型基础。



文题释义:

猕猴颈椎: 猕猴属非人灵长类实验动物, 其在脊柱解剖结构、运动生理功能等方面同人类非常接近而成为极具实验价值的动物。

有限元模型分析法: 是近年来研究人体生物力的有效方法, 其基本原理是把连续的物体离散为一组有限个、按一定方式相互联结在一起的单元组合体, 然后求其相互之间的关系及特征。

摘要

背景: 猕猴与人类均属灵长类, 其颈椎结构和生理功能及生存条件与人类十分相似, 但目前对于猕猴全颈椎有限元分析的研究甚少。

目的: 建立成年猕猴 C₀-T₁ 颈椎有限元模型及相关运动效能与人类颈椎的有限元模型之间进行对比研究, 以发现其差异性。

方法: 选择 7 岁龄成年雄性猕猴 1 只, 于 2019 年 12 月在内蒙古医科大学附属医院影像科行多层螺旋 CT 扫描, 将其原始颈椎 CT 数据导入 Mimics 21.0 中初步建立三维模型, 用 Cero 优化模型几何结构, 得到其颈椎仿真三维模型。将装配模型导入 Hypermesh 行四面体网格化, 划分颈椎各节段、椎间盘、韧带等组织网格; 再利用 Abaqus & ANSYS 构建颈椎有限元模型, 同时参考相关有限元模型文献进行有效性验证。

结果与结论: ① 成功建立猕猴颈椎三维(包含 C₀-T₁ 及 6 个椎间盘、相关韧带)有限元模型, 共 536 215 单元、461 915 节点, 模型整体仿真度高, 细小结构进行了较高精度还原, 具备较高的生物仿真性; ② 将该模型活动度与人类颈椎模型相关文献比较: 前后屈伸均较正常成人小 ($P < 0.05$)、左右侧弯 C₂₋₃、C₃₋₄、C₆₋₇ 节段小于文献标准差范围 ($P < 0.05$), 而轴向旋转与以往文献对比差异不大 ($P > 0.05$); ③ 说明猕猴颈椎有限元模型的运动效能与人类颈椎有限元模型存在较大的差异性, 可为猕猴颈椎造模研究提供理论依据。

关键词: 成年猕猴; 全颈椎; 有限元分析; 数字模型; 人类

Establishment and validation of C₀-T₁ finite element model of cervical vertebrae in adult rhesus monkeysWang Xing^{1,2}, Xu Xuebin², Zhang Shaojie^{1,2}, Zheng Bingwu³, Yang Xi², Wang Chaoqun⁴, Li Ping⁵, Ma Yuan⁶, Li Kun², Chen Jie², Li Xiaohu², Shi Jun⁷, Li Zhijun^{1,2}

¹北京中医药大学中医学院, 北京市 101000; ²内蒙古医科大学基础医学院, ²解剖学教研室, ⁶数字医学中心, ⁷生理学教研室, 内蒙古自治区呼和浩特市 010110; ³呼和浩特市动物园管理处, 内蒙古自治区呼和浩特市 010070; ⁴内蒙古医科大学附属医院影像科, 内蒙古自治区呼和浩特市 010050; ⁵内蒙古医科大学第二附属医院功能科, 内蒙古自治区呼和浩特市 010030

第一作者: 王星, 男, 1979 年生, 内蒙古自治区乌拉特中旗人, 北京中医药大学中医学院在读博士, 讲师, 主要从事脊柱脊髓的数字与临床应用解剖学研究。

并列第一作者: 徐雪彬, 女, 1992 年生, 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 内蒙古医科大学基础医学院在读硕士, 主要从事脊柱脊髓的数字与临床应用解剖学研究。

通讯作者: 李志军, 教授, 博士生导师, 北京中医药大学中医学院, 北京市 101000; 内蒙古医科大学基础医学院解剖学教研室, 内蒙古自治区呼和浩特市 010110

并列通讯作者: 史君, 副教授, 内蒙古医科大学基础医学院生理学教研室, 内蒙古自治区呼和浩特市 010110

<https://orcid.org/0000-0003-0059-4921> (王星)

基金资助: 国家自然科学基金(81860382), 项目负责人: 王星; 国家自然科学基金(81860383, 81560348), 项目负责人: 李志军; 国家自然科学基金(81660358), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古自然科学基金(2020MS03061), 项目负责人: 王星; 内蒙古自然科学基金(2019MS08017), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古自然科学基金(2019MS08139), 项目负责人: 陈杰; 内蒙古自治区科技发展计划项目(2019GG158), 项目负责人: 王星; 内蒙古自治区科技发展计划项目(2019GG111), 项目负责人: 栗平; 内蒙古医科大学科技百万项目(YKD2017KJBW009), 项目负责人: 王星; 内蒙古医科大学科技百万项目(2015YKDKJBW03), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古医科大学青年创新基金(TKD2018QNCX071), 项目负责人: 王超群

引用本文: 王星, 徐雪彬, 张少杰, 郑秉武, 杨喜, 王超群, 栗平, 马渊, 李琨, 陈杰, 李筱贺, 史君, 李志军. 成年猕猴 C₀-T₁ 全颈椎有限元模型的建立及有效性验证 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(35):5632-5637.



¹School of Traditional Chinese Medicine, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 101000, China; ²Department of Anatomy, ⁶Center for Digital Medicine, ⁷Department of Physiology, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China; ³Hohhot Zoo Management Office, Hohhot 010070, Inner Mongolia Autonomous Region, China; ⁴Department of Imaging, Inner Mongolia Medical University Affiliated Hospital, Hohhot 010050, Inner Mongolia Autonomous Region, China; ⁵Department of Function, The Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010030, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Wang Xing, MD candidate, Lecturer, School of Traditional Chinese Medicine, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 101000, China; Department of Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China
Xu Xuebin, Master candidate, Department of Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Wang Xing and Xu Xuebin contributed equally to this work.
Corresponding author: Li Zhijun, Professor, Doctoral supervisor, School of Traditional Chinese Medicine, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 101000, China; Department of Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Co-corresponding author: Shi Jun, Associate professor, Department of Physiology, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Abstract

BACKGROUND: Both rhesus monkeys and humans belong to primates, and their cervical vertebra structure, physiological function and living conditions are very similar to those of human beings. However, there are few studies on the finite element analysis of the whole cervical vertebra of rhesus monkeys.

OBJECTIVE: To establish the C₆-T₁ finite element model of cervical vertebrae of adult rhesus monkeys and to make a comparative study between the finite element models of cervical vertebrae of adult rhesus monkeys and human cervical vertebrae in order to find out the difference.

METHODS: A 7-year-old adult male rhesus monkey was selected and scanned by multi-slice spiral CT in the Imaging Department of the affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University in December 2019. The original CT data of cervical vertebrae were introduced into Mimics21.0 to establish a preliminary three-dimensional model, and the geometric structure of the model was optimized by Cero to get the simulation three-dimensional model of cervical vertebrae. The assembly model was imported into Hypermesh for tetrahedral gridding to divide the tissue grids of various segments, intervertebral discs and ligaments of cervical vertebrae. Then the finite element model of cervical vertebra was constructed by Abaqus&ANSYS, and the validity was verified by referring to the relevant finite element model literature.

RESULTS AND CONCLUSION: The three-dimensional finite element model of cervical vertebra of rhesus monkey (including C₆-T₁ and six intervertebral discs and related ligaments) was successfully established, with a total of 536 215 elements and 461 915 nodes. The overall simulation of the model was high, and the fine structure was restored with high precision, resulting in a high biological simulation performance. Comparing the range of motion of this model with that of human cervical vertebra model, we found that the flexion and extension of this model were smaller than those of normal adults ($P < 0.05$), and left and right lateral bending of C₂₋₃, C₃₋₄ and C₆₋₇ segments was smaller than the range of standard deviation as reported ($P < 0.05$). However, axial rotation showed no significant difference as compared with the value reported previously ($P > 0.05$). To conclude, there is a great difference in the exercise efficiency between the finite element models of rhesus monkey cervical vertebra and human cervical vertebra, which can provide a theoretical basis for the study of rhesus monkey cervical vertebra modeling.

Key words: adult rhesus monkey; whole cervical vertebra; finite element analysis; digital model; human

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 81860382 (to WX), 81860383, 81560348 (both to LZJ), and 81660358 (to ZSJ); Inner Mongolia Natural Science Foundation, No. 2020MS03061 (to WX), 2019MS08017 (to ZSJ), and 2019MS08139 (to CJ); Science and Technology Development Projects of Inner Mongolia Autonomous Region, No. 2019GG158 (to WX) and 2019GG111 (to LP); Science and Technology Million Project of Inner Mongolia Medical University, No. YKD2017KJBW009 (to WX) and 2015YKDKJBW03 (to ZSJ); Youth Innovation Fund of Inner Mongolia Medical University, No. TKD2018QNCX071 (to WCQ)

How to cite this article: WANG X, XU XB, ZHANG SJ, ZHENG BW, YANG X, WANG CQ, LI P, MA Y, LI K, CHEN J, LI XH, SHI J, LI ZJ. Establishment and validation of C₆-T₁ finite element model of cervical vertebrae in adult rhesus monkeys. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(35):5632-5637.

0 引言 Introduction

猕猴也称恒河猴, 属非人灵长类实验动物, 与人类的解剖结构较接近, 在类比人类的实验研究中占据不可或缺的位置^[1-3]。猕猴因其在脊柱解剖结构、运动生理功能等方面同人类非常接近而成为极具实验价值的动物, 但当下对于猕猴脊柱颈段更进一步的参考研究尚不足。脊柱外科的实验和临床研究对其所需实验动物在脊柱解剖结构、生物力学和椎间盘软组织结构上有着更高的要求^[4-5], 而利用这种与人类种属相近的动物进行比较解剖研究可进一步增加相关动物实验数据和动物模型的可靠性。为此, 对猕猴全颈椎进行生物力学分析, 同时将该模型与现有人类颈椎相关研究进行对比分析, 从而为相关动物脊柱外科手术实验及动物造模等增加部分实验参考数据。

猕猴颈椎三维有限元重建及生物力学研究有助于脊椎动物的系统演化过程和适应辐射研究。此次研究通过扫描成年雄性猕猴, 成功建立了猕猴颈椎有限元模型并与人类相关文献进行对比, 为后期生物力学分析做准备, 同时有助于深入探索猕猴的系统演化过程, 也为医学实验提供了基础性数据。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 成年猕猴全颈椎有限元模型建立与力学分析实验。

1.2 时间及地点 于2019年12月在内蒙古医科大学附属医院影像科完成。

1.3 材料 与内蒙古自治区大青山野生动物园兽医院合作, 选取1只7岁正常成年雄性猕猴, 肌肉注射盐酸氯胺酮注射液(10 mg/kg)及硫酸阿托品0.02 mg/kg, 猕猴麻醉后送于内蒙古医科大学附属医院影像科头进仰卧位行全脊柱螺旋CT扫描, 排除发育异常。CT扫描参数: 球管电压为120 kV, 电流167 mAs, Width*Height为512×512 pxl, 层厚0.625 mm, 共计785层。将数据以DICOM格式存贮, 刻录光盘保存, 便于后期资料数据的传输及应用。

1.4 实验方法

1.4.1 有限元模型建立与方法 将DICOM数据导入Mimics 21.0软件中确定阈值, 根据不同组织的CT值选取合理的阈值范围, 将骨骼部分同其他部分区分, 在选定的层面中画出颈椎所在的区域, 然后进行区域生长, 软件将计算分析出所

选中的骨骼部分，然后对研究所需不同部位进行颜色划分，按照所选定的不同 mark 进行颈椎的三维重建 (图 1)。利用 3D Region Growing 操作功能进行部分图像的填充修补，删除不需要的部分区域，整理之后进行 Calculate 3D from Mask 重建全颈椎三维模型。利用 Cero 软件去噪、铺面、平滑等处理以优化模型几何结构，将三维模型采用二进制 stl 文件导出，将数据导入 Hypermesh 软件进行进一步完善同时对原始 CT 数据，区分出椎体皮质骨、松质骨，再进行精确曲面工具等操作获得实体模型的曲面参数，最后将文件以 IGS 格式输出 (图 2)。

1.4.2 颈椎有限元模型的构建 利用 Ansys workbench 15.0 软件对已建立的猕猴颈椎三维模型进行有限元网格化，并将模型附上椎间盘及部分韧带结构 [6]。与此同时为进一步完善 C₀-T₁ 三维实体模型，随后采用前处理功能中的模块对模型进一步精细化处理，基于原始 CT 数据进一步完善颈椎各部分的精细结构，重建椎间结构，包括终板、纤维环、髓核、主要韧带 (前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘韧带和关节囊韧带)。最后使用多体部件命令建立边界拓扑共享的三维模型。最终生成完整的全颈椎三维有限元模型，材料属性定义均来自于文献 [7-8]，模型参数见表 1。

表 1 | 模型材料参数 [7-8]

Table 1 | Material parameters of the model [7-8]

属性	弹性模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	12 000	0.29
松质骨	450	0.29
终板	500	0.40
髓核	1	0.49
纤维环	110	0.30
前纵韧带	10	0.30
关节囊	10	0.30
后纵韧带	10	0.30
黄韧带	1.5	0.30
棘间韧带	1.5	0.30
棘上韧带	1.5	0.30

1.4.3 模型有效性验证 对模型给予加载力 1.5 N•m 的外力偶矩和 75 N 的垂直载荷 (模拟头部重力)，在前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转 6 种工况下模拟猕猴颈椎的运动，操作方法为：分别定义 X, Y, Z 全局坐标的纯扭矩 (其中 X-Z 平面作为冠状面定义 X-Y 平面作为水平面、定义 Y-Z 平面作为矢状面)，扭矩方向依据右手准则进行设定。分别用来仿照真实情况下，颈椎受到不同载荷工况时在屈曲、伸展、左右侧弯和轴向扭转各个方向上的应力及活动度范围，并将得到的结果与既往正常成人全颈椎有限元分析文献的实验数据进行对比验证 [9-13]。

1.5 主要观察指标 将上述所建立的正常成年猕猴 C₀-T₁ 全颈椎有限元模型在前屈、后伸、左右侧弯及轴向旋转 6 个方向上的活动度与文献数据进行比较，验证模型的有效性。

2 结果 Results

2.1 正常成年猕猴全颈椎有限元模型形态 此次研究成功建

立了正常成年雄性猕猴全颈椎三维有限元模型，在建立的模型中包含仿真度较高的颈椎、胸椎、椎间盘及韧带等结构，共计 536 215 单元，461 915 节点 (表 2)。模型外观上比较接近正常猕猴颈椎结构，形态相似，细节还原度高，具有非常好的几何相似性 (图 3)。

表 2 | 成年猕猴全颈椎正常模型单元数节点数统计

Table 2 | Statistics of the number of nodes in the normal model of the whole cervical vertebra of adult rhesus monkeys

节段	单元	节点	单元类型
C ₀	43 055	65 374	四面体
C ₁	27 424	41 511	四面体
C ₂	24 726	37 620	四面体
C ₃	29 208	44 186	四面体
C ₄	29 669	45 068	四面体
C ₅	29 490	44 998	四面体
C ₆	29 095	44 379	四面体
C ₇	22 271	34 155	四面体
T ₁	24 118	36 774	四面体
纤维环	1 695	3 780	四面体
髓核	804	1 749	四面体
软骨	576	1 284	四面体
韧带	274 084	61 037	Tension only truss

2.2 猕猴全颈椎 (C₀-T₁) 三维有限元模型各方向活动度结果

此次研究将颈椎在屈伸、左右侧弯、轴向旋转下的工况的活动度与参考文献相比。对模型的前屈后伸活动度分析来看，相较于参考数据颈椎 C₀₋₁ 活动度的标准差稍低 (表 3)。此模型与参考文献相比，C₂₋₃、C₃₋₄、C₆₋₇ 节段的左右侧屈的活动度小于参考文献中数据范围，其他节段均在文献参考值之内 (表 4)。模型的左右轴向旋转活动度均在既往参考文献资料范围之内 (表 5)。

表 3 | 猕猴颈椎各节段前屈 + 后伸具体活动度及验证 (°)

Table 3 | Specific range of motion of each cervical vertebral segment in rhesus monkeys during flexion and extension and its verification

节段	PANJABI 等 [9]	ITO 等 [10]	陈强等 [11]	郭群峰等 [12]	刘伟聪等 [13]	此文 2021
	1998	2004	2005	2014	2018	
C ₀ -C ₁	27.4±3.7	27.5±7.7	27.1±4.2	29.3	24.4	14.98
C ₁ -C ₂	24.4±5.6	15.3±4.2	16.4±5.1	22.7	26.9	12.82
C ₂ -C ₃	6.8±1.4	9.0±4.0	8.8±2.1	9.7	7.1	3.00
C ₃ -C ₄	8.2±4.7	10.0±4.5	9.7±3.4	10.7	9.1	3.78
C ₄ -C ₅	9.8±4.0	14.3±5.5	13.8±4.7	8.2	10.6	4.58
C ₅ -C ₆	10.4±5.2	14.5±8.0	14.1±6.1	9.1	7.8	4.62
C ₆ -C ₇	8.0±4.3	15.2±3.1	14.9±3.5	7.9	6.0	3.42
C ₇ -T ₁		6.9±2.4	7.6±2.6		7.6	3.05

表 4 | 猕猴颈椎各节段左右侧屈具体活动度及验证 (°)

Table 4 | Specific range of motion of each cervical vertebral segment in rhesus monkeys during left and right lateral flexion and its verification

节段	PANJABI 等 [9]	ITO 等 [10]	陈强等 [11]	郭群峰等 [12]	刘伟聪等 [13]	此文 2021
	1998	2004	2005	2014	2018	
C ₀ -C ₁	9.1±1.5	7.7±2.1	7.8±2.4	8.0	6.728 102	10.40
C ₁ -C ₂	6.5±2.3	11.6±10.4	8.9±4.5	7.2	9.349 595	6.40
C ₂ -C ₃	9.6±1.8	9.7±4.3	8.4±3.8	7.4	10.692 770	2.98
C ₃ -C ₄	9.0±1.9	8.6±5.9	8.0±3.5	7.0	12.283 780	5.31
C ₄ -C ₅	9.3±1.7	8.1±3.8	7.5±3.7	6.6	9.051 207	6.05
C ₅ -C ₆	6.5±1.5	4.9±2.1	4.8±2.4	6.0	8.114 717	4.78
C ₆ -C ₇	5.4±1.5	6.8±3.3	3.9±2.1	6.0	5.280 613	2.84
C ₇ -T ₁		3.9±2.1	2.9±1.4		4.927 859	2.50

表 5 | 猕猴颈椎各节段左右轴向旋转具体活动度及验证 (°)

Table 5 | Specific range of motion of each cervical vertebral segment in rhesus monkeys during left and right axial rotation and its verification

节段	PANJABI 等 ^[9] 1998	ITO 等 ^[20] 2004	陈强等 ^[11] 2005	郭群峰等 ^[12] 2014	刘伟聪等 ^[13] 2018	此文 2021
C ₀ -C ₁	9.9±3.0	13.0±5.5	11.4±4.2	14.88	22.089 690	9.37
C ₁ -C ₂	56.7±4.8	63.3±13.0	58.7±8.4	67.80	68.011 280	57.25
C ₂ -C ₃	3.3±0.8	6.6±4.8	6.7±3.9	12.06	8.981 798	8.45
C ₃ -C ₄	5.1±1.2	9.5±4.9	7.1±2.1	11.68	12.737 910	8.70
C ₄ -C ₅	6.8±1.3	11.5±3.8	9.0±1.8	10.52	8.754 505	8.97
C ₅ -C ₆	5.0±1.0	7.8±4.1	7.7±3.4	9.42	5.897 849	6.50
C ₆ -C ₇	2.9±0.8	6.5±3.3	6.0±2.1	9.24	6.405 986	5.28
C ₇ -T ₁		9.0±5.1	7.4±3.7		9.598 119	4.61

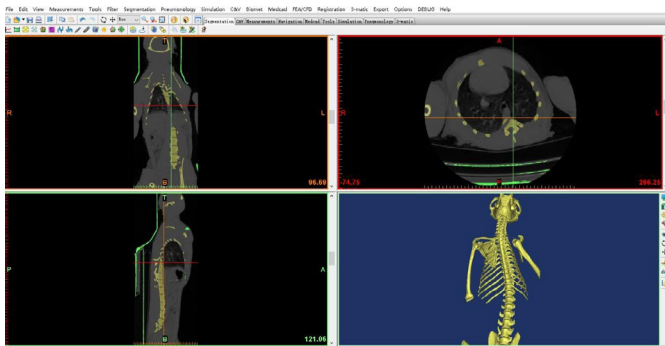
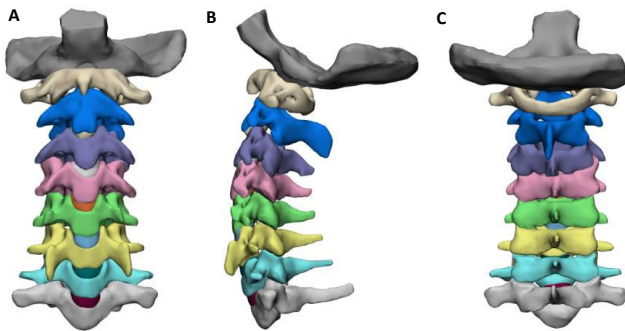


图 1 | 猕猴颈椎 Mimics 21.0 软件操作界面

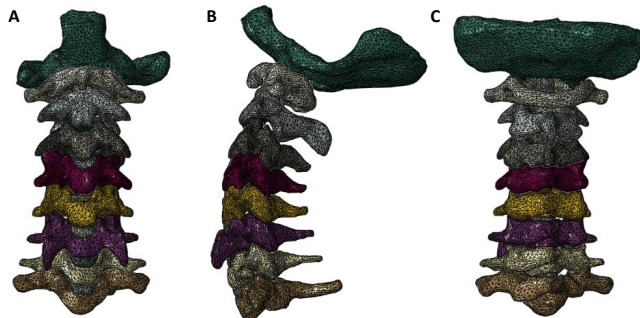
Figure 1 | Operating interface of Mimics 21.0 software for rhesus monkey cervical vertebra



图注：图 A 为正视图，B 为正中立状面图，C 为后视图

图 2 | 猕猴颈椎重建几何模型

Figure 2 | Geometric models of cervical vertebra reconstruction in rhesus monkeys



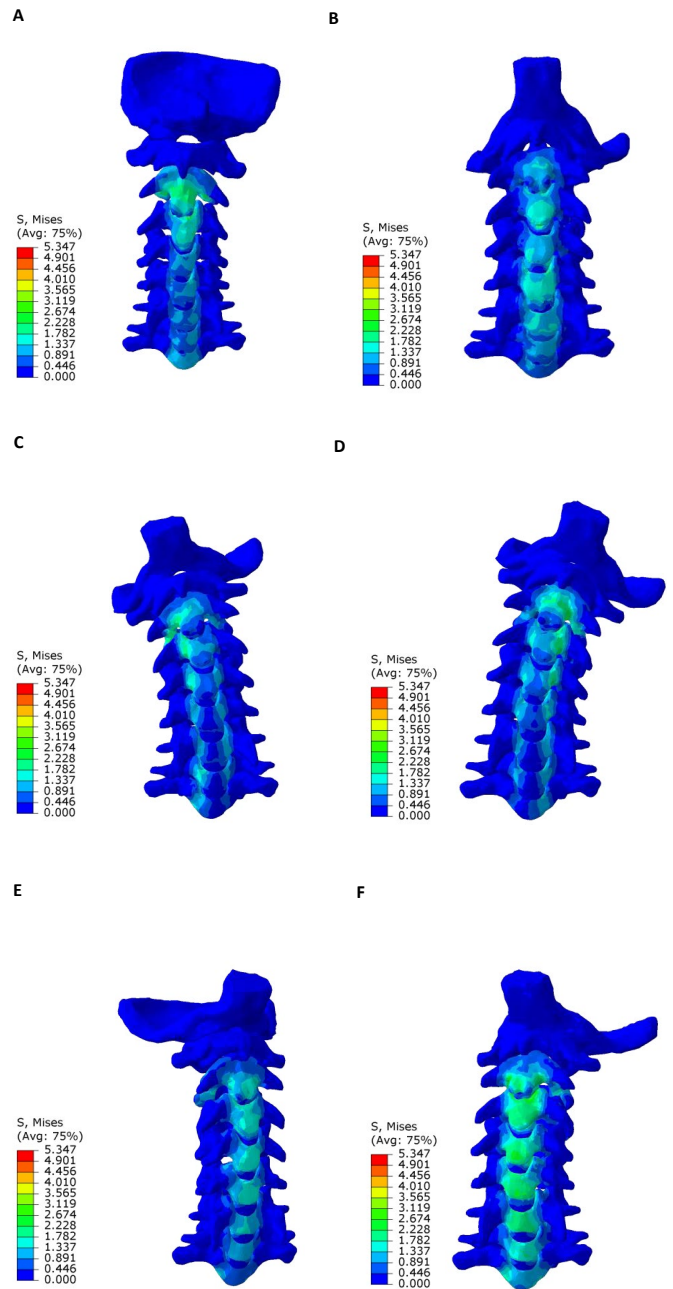
图注：图 A 为正视图，B 为正中立状面图，C 为后视图

图 3 | 成年猕猴完整颈椎重建网格有限元模型

Figure 3 | Finite element models of complete cervical vertebra reconstruction of adult rhesus monkeys

2.3 猕猴全颈椎 (C₀-T₁) 三维有限元模型应力分布结果

模型后伸时应力主要集中于在颈椎前部，以椎体部所受应力较大 (图 4A)。在前屈时应力主要集中于 C₂、C₃ 的前部，在 C₂ 的齿突及椎体部分受力大于其他部位 (图 4B)。在左右侧屈曲时，对于 C₂ 的椎体部分及剩余颈椎的侧屈方向的小关节及椎弓根处应力相对集中。其对侧也有部分应力集中，尤其在 C_{2,3} 及 C_{3,4} 的椎弓根及小关节处较为明显 (图 4C, D)。在左右侧轴向扭转时在 C_{2,3} 的椎体前部所受应力较大，同时椎体对侧的小关节和椎弓根处也明显受力 (图 4E, F)。



图注：图 A-F 分别为后伸前屈、左右侧屈及左右旋转的 Mises 应力云图

图 4 | 成年猕猴颈椎伸展位及屈曲位 Mises 应力云图

Figure 4 | Mises stress cloud map of cervical extension and flexion in adult rhesus monkeys

3 讨论 Discussion

3.1 模型的特点及有效性验证 此次实验首次将全颈椎薄层CT的体内实验与皮质骨材料特性的体外实验数据相结合,成功建立成年雄性猕猴全颈椎有限元模型并评估其活动度及应力应变特征。为探讨猕猴颈椎与人类颈椎生长发育的解剖差异性,需通过具有代表性的实验数据进行对比研究,才能使分析颈椎运动的活动度及应力应变数据更加可靠。通过影像学观察发现,灵长类动物猕猴颈椎和人类颈椎非常相似,均为7块椎骨,并且具有颈椎所特有的结构“钩椎关节”,因此可作为人类颈椎造模的最佳选择。有限元分析作为脊柱力学分析常用的一项指标,为临床力学研究和手术治疗提供了有利的技术支持。此次研究正是基于上述特点去研究正常成人和猕猴全颈椎有限元模型之间的差异,为后期临床研究及假体制造提供理论依据,通过查阅文献发现关于猕猴全颈椎有限元模型建立的研究非常少,此次研究通过建立完整的颈椎有限元模型,并进行前屈、后伸及左右侧屈6种工况下的受力分析,在与成人颈椎前屈和后伸等活动度对比中发现,猕猴全颈椎的前屈及后伸均小于正常人类;而在左右侧屈活动度比较中, $C_{2,3}$ 、 $C_{3,4}$ 、 $C_{6,7}$ 活动度小于正常成人。此次研究结果与PANJABI等^[9-13]的结论存在差异,推测由于猕猴机体适应性形态特征及栖息环境造成,猕猴的前肢与后肢约等长,四肢关节的协调性较强,前肢的腕部与后肢的大腿部均和躯干部连接不紧密,因而猕猴的四肢可具有较大范围的运动轨迹。此外前肢腕部及后肢的小腿与躯干部连接不紧密,猕猴甚至可以完成回转前后脚而不带动躯干,正是这样的特性,猕猴在活动中颈椎的前屈、后伸及左右侧屈运动逐渐减少,进而活动度逐渐降低,而其左右轴向旋转与正常成人差别均在标准差范围内,这可能与猕猴具有生存机敏多方向观望习性有关^[14-16],因此对比分析此次研究建立的猕猴全颈椎有限元模型基本符合其颈椎的应力分布及生物力学变化。对比猕猴与成人全颈椎模型的应力分布,在局部赋予1.5 N·m纯扭矩载荷条件下,对模型在前屈、后伸、左右侧弯和轴向扭转各个方向上的运动度进行测量,通过与既往文献报道的活动度进行比较验证,并发现模型在各方向活动时局部应力分布情况基本与正常人体力学特性吻合^[17-19]。此次实验认为在不同载荷条件下,该模型在各个方向上的活动度及力学特性真实,通过模型验证证实该模型具有有效性。

3.2 模型建立的意义 猕猴解剖结构与人类非常相似,因此是细胞生物学、行为心理学、临床医学等许多科研工作中较理想的研究对象,同时又是理想的医学实验动物^[20-28]。对于动物颈椎的研究早年多集中于形态学观测及血流动力学方面^[29-32],而对于脊椎动物的颈椎生物力学研究则甚少。薛德明^[33]对成年太行山猕猴寰椎和枢椎变量进行测量,发现寰椎全宽及枢椎椎孔横径的生长几乎呈现出等速性,其余变量均为负异速生长。范春梅等^[34]获得了正常成年猕猴头颈部的影像学基础资料,为CT技术在猕猴影像学研究、

解剖学研究、疾病诊断及科研实验方面的应用提供了参考。肖莉等^[35]对3具雌性藏酋猴脊柱标本进行形态学观察,发现其脊柱及各椎体的形态结构与金丝猴、猕猴、懒猴及人类存在着明显差异,增加了对灵长类动物脊柱的认识。SPARREY等^[36]通过建立非人类灵长类脊髓损伤模型并行力学分析,有助于更好地反映人类脊柱脊髓损伤,为评估潜在的治疗方法和功能结果提供了更好的基础。LING等^[37]通过对猕猴和成人磁共振T1和T2 map检查终板的组成和结构增龄变化,探讨终板与椎间盘退变的相关性,进而提出使用T2 map评估终板退变的新临床应用。而此次研究建立有限元模型分析猕猴全颈椎活动度及应力应变数据,是在前人研究的基础上进一步推进了对于灵长类脊椎进化过程及演化行为的探索。

3.3 研究的不足与展望 此次研究虽然完整建立了猕猴全颈椎的有限元模型及受力分析特点,但是由于样本只有1例,数据结果可能不具有代表性,同时与不同学者就人类颈椎有限元力学分析进行对比研究,因没有设定相同的条件,因此其可比性缺乏说服力。但是此次实验对猕猴全颈椎三维有限元及生物力学进行了探索,是之前研究的补充和延伸,在之后研究中将此模型与其他灵长类和其他猕猴亚种的资料进行比较,从而深化对灵长类脊椎动物的认识,这是未来实验和建模进一步研究的方向。

作者贡献: 王星、郑秉武负责实验设计,徐雪彬、张少杰负责文章撰写,杨喜、王超群、栗平、马渊负责实验实施,李琨、陈杰、李筱贺负责实验数据统计,李志军负责实验结果评估,史君负责文章校审。

经费支持: 该文章接受了“国家自然科学基金(81860383, 81660358, 81860382, 81560348)、内蒙古自然科学基金(2019MS08017, 2019MS08139, 2020MS03061)、内蒙古自治区科技发展计划项目(2019GG158, 2019GG111)、内蒙古医科大学科技百万项目(2015YKDKJBW03, YKD2017KJBW009)及内蒙古医科大学青年创新基金(TKD2018QNCX071)”的基金资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程不存在利益冲突。

机构伦理问题: 实验方案经内蒙古医科大学伦理委员会批准,批准号为YKD2018031。实验过程遵循了国际兽医学编辑协会《关于动物伦理与福利的作者指南共识》和本地及国家法规。

写作指南: 该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] 钟品仁, 主编. 哺乳类实验动物 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1987: 317.
- [2] ARORA T, ZHANG L, PRASAD P. Development of a Subhuman Primate Brain Finite Element Model to Investigate Brain Injury Thresholds Induced by Head Rotation. *Stapp Car Crash J.* 2019;63:65-82.
- [3] GOEL A, KASWA A, SHAH A. Role of atlantoaxial and subaxial spinal instability in pathogenesis of spinal 'degeneration' related cervical kyphosis. *World Neurosurg.* 2017;101:702-709.
- [4] WANG XD, FENG MS, HU YC. Establishment and Finite Element Analysis of a Three-dimensional Dynamic Model of Upper Cervical Spine Instability. *Orthop Surg.* 2019;11(3):500-509.
- [5] 邵荣学, 全仁夫, 王拓, 等. 新型梯度复合 HA/ZrO₂ 组织工程骨支架在猕猴颈椎融合中的应用 [J]. *中华解剖与临床杂志*, 2017, 22(6): 499-509.
- [6] BONO CM, MIN W. Avoiding complications in patients with ankylosing spondylitis undergoing spine surgery. *Curr Opin Orthop.* 2005;16(3): 178-183.
- [7] SHIRAZI-ADL A, AHMED AM, SHRIVASTAVA SC, et al. Mechanical response of a lumbar motion segment in axial torque alone and combined with compression. *Spine.* 1986;11(9):914-927.
- [8] 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. *Clin Biomech.* 2007;22(4):377-384.
- [9] PANJABI MM, CRISCO JJ, VASAVADA A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *Spine.* 2001;26(24):2692-2700.
- [10] ITO S, IVANCIC PC, PANJABI MM, et al. Soft tissue injury threshold during simulated whiplash: a biomechanical investigation. *Spine.* 2004; 29(9):979-987.
- [11] 陈强. 挥鞭样损伤的生物力学和临床研究 [J]. *第二军医大学学报*, 2005, 12(3):631-635.
- [12] 郭群峰, 陈方经, 倪斌, 等. 带有颅底的全颈椎三维有限元模型的建立及分析 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2014, 24(6):550-554.
- [13] 刘伟聪, 陈雄生, 周盛源, 等. 正常人体 C0-T1 全颈椎有限元模型的构建及意义 [J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(11):1707-1712.
- [14] OLSZKO AV, BELTRAN CM, VASQUEZ KB, et al. Initial analysis of archived non-human primate frontal and rear impact data from the biodynamics data resource. *Traffic Injury Prev.* 2018;15(7):1165-1169.
- [15] 凌泽莎. 猕猴椎动脉及横突孔大水的 CTA 观察及其 CSA 模型的可行性研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2014.
- [16] LEE JH, PARK WM, KIM YH, et al. A Biomechanical Analysis of an Artificial Disc With a Shock-absorbing Core Property by Using Whole-cervical Spine Finite Element Analysis. *Spine.* 2016; 41(15):893-897.
- [17] KIM YH, KHUYAGBAATAR B, KIM K. Recent advances in finite element modeling of the human cervical spine. *J Mech Sci Technol.* 2018;32(8): 1-10.
- [18] BARKER JB, CRONIN DS, NIGHTINGALE RW. Lower Cervical Spine Motion Segment Computational Model Validation: Kinematic and Kinetic Response for Quasi-Static and Dynamic Loading. *J Biomech Eng.* 2017;139(6):610-613.
- [19] LASSWELL TL, CRONIN DS, MEDLEY JB, et al. Incorporating ligament laxity in a finite element model for the upper cervical spine. *Spine J.* 2017;17(4):1755-1764.
- [20] 凌泽莎, 贾功伟, 谭波涛, 等. 注射复合 rhBMP-2 骨水泥制作猕猴椎动脉型颈椎病模型 [J]. *中山大学学报 (医学科学版)*, 2016, 37(5): 775-780.
- [21] CUNNINGHAM AS. Growth and Sexual Dimorphism of the Hyoid Body in *Macaca mulatta*. *Springer US.* 2020;28:178-181.
- [22] ARORA T, ZHANG L, PRASAD P. Development of a Subhuman Primate Brain Finite Element Model to Investigate Brain Injury Thresholds Induced by Head Rotation. *Stapp Car Crash J.* 2019;63(3):65-82.
- [23] 陈江波, 潘希敏, 陈应明, 等. 磁共振 T2 mapping 和 T1ρ 成像研究群养成年恒河猴腰椎间盘的退变过程 [J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(3):418-422.
- [24] 汪韬, 党耕町, 郭昭庆, 等. 自体骨髓基质干细胞与钙磷陶瓷复合体在恒河猴腰椎前路融合中的实验研究 [J]. *中华外科杂志*, 2006, 44(12):843-847.
- [25] 宋伟, 赵文, 魏瑞晗, 等. 脊髓损伤恒河猴后肢步态数据处理方法的设计 [J]. *中国康复理论与实践*, 2013, 19(8):734-738.
- [26] 闵少雄, 李森, 刘成龙, 等. 恒河猴骨髓间质干细胞体外培养及诱导分化成骨细胞的实验研究 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(3): 228-232.
- [27] 孔杰, 王子轩, 季爱玉, 等. 应用微创技术建立恒河猴腰椎间盘早期退变模型 [J]. *中华外科杂志*, 2008, 46(11):835-838.
- [28] 黄帆, 邓忠良. 部分可吸收椎间融合器应用于恒河猴腰椎融合的研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2013.
- [29] 凌泽莎, 周志明, 郑晓, 等. 实验用猕猴颈部骨骼和血管的影像学及血流动力学分析 [J]. *中国实验动物学报*, 2015, 23(5):500-505.
- [30] WATSON DV, GANDHI AA, FREDERICKS DC, et al. Sheep cervical spine biomechanics: a finite element study. *Iowa Orthop J.* 2014;34:137-143.
- [31] MENGONI M, VASILJEVA K, JONES AC, et al. Subject-specific multi-validation of a finite element model of ovine cervical functional spinal units. *Biomech.* 2016;49:259-266.
- [32] 盛孙仁, 徐华梓, 王向阳, 等. 猪、小牛与人颈椎的生物力学比较 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(5):380-384.
- [33] 薛德明. 太行山猕猴寰椎和枢椎的初步研究 [J]. *动物学杂志*, 2003, 9(2):74-75.
- [34] 范春梅, 李志雄, 周建华. 实验猕猴头颈部 CT 影像学观察 [J]. *畜禽业*, 2012, 10(4):30-32.
- [35] 肖莉, 杨红, 石清明, 等. 藏酋猴脊柱的解剖学研究 [J]. *西南国防医药*, 2017, 5(10):1037-1040.
- [36] SPARREY CJ, SALEGIO EA, CAMISA W, et al. Mechanical Design and Analysis of a Unilateral Cervical Spinal Cord Contusion Injury Model in Non-Human Primates. *J Neurotrauma.* 2016;33(12):1136-1149.
- [37] LING Z, LI L, CHEN Y, et al. Changes of the end plate cartilage are associated with intervertebral disc degeneration: A quantitative magnetic resonance imaging study in rhesus monkeys and humans. *J Orthop Translat.* 2020;24:23-31.

(责任编辑: GD, ZN, SX)