

成人肘关节及前臂三维有限元模型的建立

王晓旭¹, 宋 晖², 曾 智¹, 杨俊涛¹

(1. 南华大学附属第二医院骨科, 湖南 衡阳 421001; 2. 深圳市光明新区人民医院手外科)

摘要: **目的** 建立成人肘关节及前臂三维有限元模型, 为进一步进行生物力学研究打下基础。 **方法** 拍摄健康成人肘关节至腕关节薄层 CT 图像, 将其导入 Mimics、Hypermesh 软件中建立肘关节及前臂三维有限元模型, 用模型进行负荷加载实验并在 LS-DYNA 中运算, 将结果与以往的实验数据进行对比验证模型的有效性。 **结果** 建立的肘关节及前臂三维有限元模型与实体解剖标本相似度高, 通过模型有效性的验证能准确反映肘关节及前臂的生物力学特性。 **结论** 使用有限元法建立肘关节及前臂三维有限元模型进行生物力学研究是可行的。

关键词: 有限元; 肘关节; 桡骨头; 应力

中图分类号: R68 **文献标识码:** A

Construction of 3D Finite Element Model in Elbow Joints and Forearms for Adults

WANG Xiaoxu, SONG Hui, ZENG Zhi, et al

(Department of Orthopedics, the Second Affiliated Hospital, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: **Objective** This research aims to build the 3D finite element model in elbow joint and forearms for adults. **Methods** The thin slice images between the elbow joint and wrist joints of healthy adults, obtained from CT scanners, are imported to software (eg. Mimics, Hypermesh) in order to build a 3D finite element models of elbow joint and forearms. The constructed model is used to do stress loading experiment, using LS-DYNA for calculation. The final results are compared with former experimental results we got for testifying the validity of the current model. **Results** The similarity between the constructed 3D finite element model of adult elbow joints and forearms and its corresponding human anatomy specimen is high; the biomechanical properties could be reflected rightly by testifying the model validity. **Conclusion** It is feasible to analyze orthopaedic biomechanics through the construction of 3D finite element model of adult elbow joint and forearms based on finite element methods.

Key words: finite element; elbow joint; radial head; stress loading

有限元法 (finite element method, FEA) 是将连续的求解域离散为一组单元的组合体, 用在每个单元内假设的近似函数来分片的表示求解域上待求的未知场函数, 从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。自有限元法问世以来, 其首先在航空、航天及力学领域兴起, 现已在很多领域

得到广泛应用, 并于上世纪 70 年代逐渐开始被运用于骨科生物力学研究。随着 CT 技术的发展, 三维重建技术在骨关节损伤中应用日益广泛^[1]。因此, 本实验将运用有限元法结合高分辨率 CT 建立高仿真度的成人肘关节及前臂有限元模型, 为后续进行桡骨头生物力学研究打下坚实的基础。

收稿日期: 2013-03-04

基金项目: 深圳市科委卫生类项目 (201103212)。

作者简介: 王晓旭, 硕士, 主治医师, 研究方向: 关节外科, E-mail: wxx1024@163.com. 通讯作者宋晖, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 手外科, E-mail: songhui1964@163.com.

1 资料与方法

1.1 对象

男性志愿者, 27 岁, 身高 171 cm, 体重 68 kg。

既往无肘关节及前臂损伤及相关疾病史,通过肘关节及前臂 X 片、CT 及 MRI 排除相关疾病,研究经本院医院伦理学委员会批准,经研究对象知情同意。

1.2 设备和软件

Philips MX8000 型 64 排螺旋 CT 扫描机;Mxlite-view Verion1.18 工作站;Inter(R) Xeon(R) CPU、2.40GHz(双核)、4.0GB 内存计算机。软件 Mimics10.01(比利时 Materialise 公司),Hypermesh10.0(美国 Altair 公司),LS-DYNA971(美国 LSTC 公司)。

1.3 模型的建立

用 64 排螺旋 CT 对志愿者的右肘及前臂(包括肘上 10.0 cm 至下尺桡关节)于伸肘 0°位分别置前臂于旋前、中立及旋后位进行 CT 扫描,将得到的影像数据导入 Mimics10.01 进行三维重建,建立肘关节及前臂不同位置的三维数字模型。再导入有限元前处理软件 Hypermesh10.0 中,建立肘关节的内、外侧副韧带、桡骨头环状韧带及前臂骨间膜。随后对模型进行有限元网格划分,建立有限元网格模型。

各模型的相关参数如下:前臂旋前位模型节点数 17 793,单元数 75 011,其中松质骨 67 346,皮质骨 6 605,骨间膜 829,韧带 227;前臂中立位模型节点数 17 789,单元数 74 946,其中松质骨 67 346,皮质骨 6 605,骨间膜 787,韧带 227;前臂旋后位模型节点数 17 793,单元数 75 011,其中松质骨 67 346,皮质骨 6 605,骨间膜 761,韧带 227。

最后将模型中的各种组织材料全部简化为各向同性的均质性弹性材料,根据文献[2]进行材料属性赋值(见表 1),最终建立了肘关节及前臂的三维有限元模型(图 1)。

表 1 组织材料属性

弹性性能	皮质骨	松质骨	韧带	骨间膜
弹性模量(GPa)	17.5	0.8	0.43	0.43
泊松比	0.3	0.3	0.45	0.45

1.4 负荷加载实验

为验证模型的有效性,对模型进行负荷加载实验,将得出的结果与以往相关的实验数据进行对比来验证模型的有效性。将模型肱骨端固定,从腕关节对尺桡骨施以 100 N 轴向载荷,导入有限元运算软件 LS-DYNA971 进行分析计算肘关节分别屈曲 0°、30°、60°、90°及 120°时肘关节桡骨及尺骨关节面的应力大小及分布(表 2、3、4)。



图 1 旋前(左)、中立(中)、旋后位(右)时肘关节及前臂三维有限元模型

表 2 旋前位加载各关节面应力的分布(N)

关节面屈曲角度	桡骨头	肱尺外侧面	肱尺内侧面	鹰嘴中间嵴
0°	57.6	16.4	14.9	11.1
30°	59.8	5.4	14.8	20.0
60°	55.1	5.9	19.7	14.3
90°	47.5	15.0	11.8	30.7
120°	49.6	14.8	26.3	9.3

表 3 中立位加载各关节面应力的分布(N)

关节面屈曲角度	桡骨头	肱尺外侧面	肱尺内侧面	鹰嘴中间嵴
0°	48.2	13.1	32.9	5.8
30°	55.4	4.0	15.8	24.8
60°	53.6	8.1	20.2	18.1
90°	35.5	26.9	12.8	24.8
120°	39.0	25.1	26.7	9.2

表 4 旋后位加载各关节面应力的分布(N)

关节面屈曲角度	桡骨头	肱尺外侧面	肱尺内侧面	鹰嘴中间嵴
0°	48.8	23.9	25.1	8.2
30°	52.5	6.9	13.8	26.8
60°	50.1	7.8	20.8	21.3
90°	29.6	24.7	32.8	12.9
120°	45.0	12.2	23.1	19.7

1.6 有效性分析

根据以上结果可得知,实验中肘关节屈肘 0°及 30°、前臂旋前时,经桡骨头传导的应力值最大,30°时为极限,而前臂于中立、旋后及屈肘角度增大时经桡骨头传导的应力值相应减少,这与 Morrey 等^[3]的实验结论“在屈肘 0°~30°、前臂旋前时,经桡骨头传导的应力最大;而在前臂旋后及屈肘角度增大时

经桡骨头传导的应力减小”是相吻合的。前臂处于旋前位、屈肘 0° 时桡骨头应力传导分布情况为 57.6 N, 占所施应力的 57.6%, 结果与杨运平等^[4]的实验结论“经桡骨头传导的应力大小约占肘关节总应力的 55%”、张建新等^[5]的实验结果“经桡骨头传导的应力值约占肘关节总应力值的 58%”类似。且在前臂处于旋后位时(图 2A)从关节面应力云图分布情况来看, 实验中应力主要集中在桡骨头外侧,

而前臂处于旋前(图 2B)、中立位时(图 2C)应力主要集中在桡骨头内侧, 结论与 Takatori 等^[6]的实验结论“当前臂旋后时应力主要集中在桡骨头外侧; 前臂处于旋前和中立位时应力主要集中在桡骨头内侧”、Inoue 等^[7]的实验研究结果“前臂在旋后位时应力主要集中于桡骨头前外侧”基本吻合。故该模型是有效的, 符合下一步实验研究的标准。

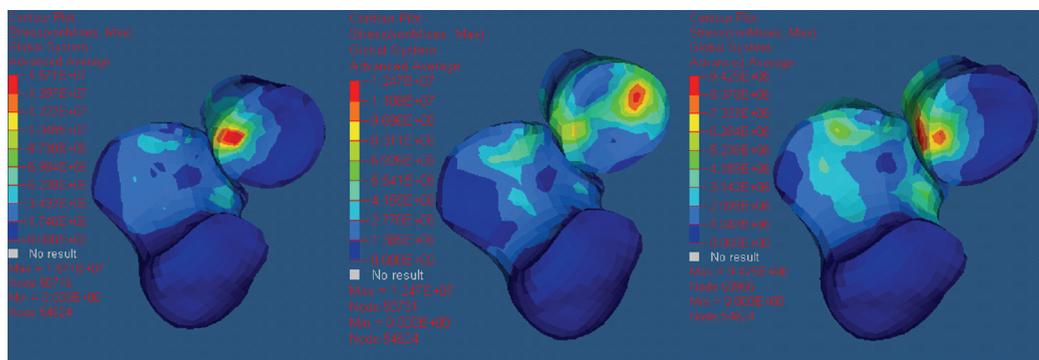


图 2 前臂不同位置应力加载关节面应力云图 A: 前臂旋后位加载; B: 前臂旋前位加载; C: 前臂中立位加载

2 结 果

采用计算机辅助技术方法并运用 Mimics 及 Hypermesh 软件, 成功建立了肘关节及前臂三维有限元模型, 即得到前臂旋前、中立及旋后位三个有限元模型结果。模型建立后在肘关节不同程度屈曲的轴向加载实验中所获得相关数据, 与国内外相关学者的实验结果基本吻合, 无明显差异, 验证了模型的有效性。

3 讨 论

3.1 有限元法在生物力学领域的应用

生物力学的研究主要有两种方法, 一种是实验生物力学研究, 即以实体模型进行力学分析; 而另一种则是理论生物力学研究, 是通过相关数学物理方法进行力学分析^[8], 有限元法即属此类。

有限元法较传统的实验生物力学研究相比具有如下优势: (1) 能够高度模拟物体的结构和材料特性; (2) 不但可以精确的反映区域信息, 而且也可以反映整体信息; (3) 既可以精确的数字分析, 又可以形象、直观的定性研究; (4) 分析研究重复性好; (5) 模型可反复使用, 无耗损, 对比研究的可比性强, 无需统计

推断; (6) 能研究其他方法所不能做到的加载及条件约束, 得到客观实体实验所无法获得的研究结果^[9-11]。因此, 有限元法在生物力学领域得到广泛的应用, 目前在骨折发生机理、关节韧带受力分析、人工假体应力分析及设计、骨折内固定方法对比等方面均可见应用, 如 Klues 等^[12]利用有限元法分析比较膝关节置换中陶瓷与钴钼合金两种材料股骨端假体应力有限元分析、Wang 等^[13]利用有限元法研究高龄患者各种椎骨骨折、徐洪璋等^[14]利用有限元法建立了髌骨骨折 AO 张力带内固定有限元模型用于张力带应力分析等。虽然利用有限元法进行生物力学实验原本就较实际结果有部分偏差, 且不同的建模方法中存在着诸多的因素制约, 使实验结果误差大小不一, 但随着计算机技术的高速发展, 仍可相信在未来这些误差会逐渐缩小化, 使实验结果无限接近于客观事实, 同样也相信有限元法在生物力学领域的前景会更加广阔, 其也会被更多的科学领域所应用。

3.2 模型的评价

应用有限元法进行力学分析, 最基础也是最重要的部分在于模型的建立, 一个高度仿真且有效的模型是实验成功的关键。目前建模的方法主要有以下几类: (1) 表面建模法: 即通过物体表面轮廓的数据点进行建模, 但此方法只包含了外部形态, 模型内

部结构空虚,缺乏模型的完整性;(2)组织切片建模法:如方驰华等^[15]即应用此法重建肝脏,此法的具有高度仿真性,但无可靠的组织赋值材料;(3)基于CT、MRI等影像数据建模法。本实验即采用此法,因CT对骨组织成像良好,MRI对软组织成像清楚,且建模快速便捷,故得到广泛应用^[16]。本实验模型采用64排螺旋CT对健康成人肘关节及前臂进行扫描,得到层厚0.5 mm薄层像素512×512高清晰度影像,保证了影像数据来源的精度;而使用较新版的有限元处理软件(Mimics10.01, Hypermesh10.0及LS-DYNA971)相结合进行分析,使建模方法及过程较以前大为改进。

但一个高度仿真的模型还是需要相关检验来验证的,此前许多类似研究均过于追求建模的精确性,而忽略了对模型的验证,实际上模型的验证也是非常关键的,只有通过模型的验证,才能够减少模型存在的误差,得到更为真实的实验数据。对有限元模型验证的方法主要有两类,一是用实体模型力学研究得到数据,然后将所建有限元模型行相同的力学研究,两者数据相对比来验证;另一种是通过寻找先前类似的相关文献资料,行同样的实验对比来验证,本实验即采用此方法。相对于第一种方法,后者虽不如其严格与精密,但工作量少,实验方法简单易行,所以应用也更为广泛^[17]。本模型经验证后与国内外相关文献数据进行对比后结果基本吻合,说明模型是具有良好有效性的。

采用有限元法建立成人肘关节及前臂三维有限元模型进行生物力学实验研究是可行的。虽然有限元法有着传统实体实验无法替代的优势,但其本身也有许多不足之处,如模型的简化及假设、组织材料分布过于均匀等,总的说来,优势还是远大于其不足。相信未来科技的发展,不足之处会逐渐淡化,运用有限元法进行生物力学实验将会得到更精确的实验结论。

参考文献:

- [1] 秦红卫,柯祺,邓凤贤. 16层螺旋CT技术参数对肘关节容积重建图像质量的影响[J]. 南华大学学报:医学版,2006,34(4):545-549.
- [2] 王以进,王介麟. 骨科生物力学[M]. 北京:人民军医出版社,1989:310.
- [3] Morrey BF, An KN, Stormont TJ. Force transmission through the radial head [J]. Bone Joint Surg (Am), 1988, 70:

250-256.

- [4] 杨运平,徐传达,樊继宏,等. 桡骨头的应力传导作用及其临床意义[J]. 中华骨科杂志,2001,21(2):84-86.
- [5] 张建新,田洪波,陈日齐. 成人桡骨头切除术后并发症的三维有限元分析[J]. 医用生物力学,2009,24(6):444-447.
- [6] Takatori K, Hashizume H, Wake H, et al. Analysis of stress distribution in the humeroradial joint [J]. J Orthop Sci, 2002,7(6):650-657.
- [7] Inoue S, Harata S, Toh S. Biomechanical analysis of osteoarthritis of the elbow joint [J]. J Joint Surg, 1997,16:72-82.
- [8] 任世红,刘洪涛,刘晓阳,等. 半月板三维有限元模型的建立[J]. 现代生物医学进展,2011,(11)7:1318-1320.
- [9] Lohfeld S, Barron V, McHugh PE. Biomodels of bone: a review [J]. Ann Biomed Eng, 2005,33(10):1295-1311.
- [10] Yosibash Z, Trabelsi N, Milgrom C. Reliable simulations of the human proximal femur by high-order finite element analysis validated by experimental observations [J]. J Biomech, 2007,40(16):3688-3699.
- [11] Kupczik K, Dobson CA, Fagan MJ, et al. Assessing mechanical function of the zygomatic region in macaques: validation and sensitivity testing of finite element models [J]. J Anat, 2007,210(1):41-53.
- [12] Klues D, Mittelmeier W, Bader R. Intraoperative impaction of total knee replacements: An explicit finite-element-analysis of principal stresses in ceramic vs. cobalt-chromium femoral components [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2010,25(10):1018-1024.
- [13] Wang X, Sanyal A, Cawthon PM, et al. Prediction of new clinical vertebral fractures in elderly men using finite element analysis of CT scans [J]. J Bone Miner Res, 2012,27(4):808-816.
- [14] 徐洪璋,余斌. 髌骨骨折AO张力带内固定有限元模型的建立和分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2011,15(13):2339-2344.
- [15] 方驰华,周五一,黄立伟,等. 虚拟中国人女性一号肝脏图像三维重建和虚拟手术的切割[J]. 中华外科杂志,2005,43(11):748-752.
- [16] 钟务学,张银网,朱海波,等. 采用体绘制方法建立人股骨三维有限元模型及其应力分析[J]. 中国组织工程研究,2012,16(17):3048-3051.
- [17] 钟砚琳,王海鹏,容可,等. 不同屈曲角度下膝关节主要韧带有限元模型的建立和验证[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2010,14(30):5515-5518.

(此文编辑:朱雯霞)