

正常下尺桡关节三维有限元模型的建立及验证★

颜冰珊¹, 尹望平¹, 聂文忠², 黄煌渊³, 朱梁豫¹

Construction and validation of a three-dimensional finite element model of the distal radioulnar joints

Yan Bing-shan¹, Yin Wang-ping¹, Nie Wen-zhong², Huang Huang-yuan³, Zhu Liang-yu¹

Abstract

BACKGROUND: Finite element analysis, characterized by repeatable and comprehensive performance test, has been frequently utilized in biomechanics analysis of fracture and fixation, such as forearm fracture, but there are few studies on distal radioulnar joints.

OBJECTIVE: To establish and validate a more precise three-dimensional (3D) finite element model (FEM) of distal radioulnar joint.

METHODS: Data of CT and MRI sectional images, obtained from a healthy man, were inputted into MIMICS10.1 and ANSYS10.0 to generate 3D finite element model of distal radioulnar joint. Simulating under bending load, axial compression load and the torsion load conditions, the Vonmises stress distribution of distal radioulnar joint were detected and compared with the results of experiment *in vitro* for validation.

RESULTS AND CONCLUSION: The model consisted of 333 805 elements and 508 384 nodes, which reflected the real geometric structure of the distal radioulnar joint objectively. Under bending, axial compression and the torsion load conditions, theoretical analysis results are consistent well in biomechanics. The current finite element model of the distal radioulnar joint can properly simulate the characteristic of the distal radioulnar joint in biomechanics testing.

Yan BS, Yin WP, Nie WZ, Huang HY, Zhu LY. Construction and validation of a three-dimensional finite element model of the distal radioulnar joints. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu*. 2011;15(17): 3135-3138. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

¹Department of Orthopaedic Surgery, Jinshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200540, China; ²College of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200235, China; ³Department of Orthopedics, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China

Yan Bing-shan★, Master, Physician, Department of Orthopaedic Surgery, Jinshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200540, China

Correspondence to: Yin Wang-ping, Master, Chief physician, Associate professor, Master's supervisor, Department of Orthopaedic Surgery, Jinshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200235, China ywp_2009@sina.com

Received: 2010-12-18 Accepted: 2011-02-23

摘要

背景: 国内外学者已应用有限元分析在前臂的桡骨骨折及其固定、尺骨骨折及其固定等方面进行了生物力学评价, 但还未见应用该方法对下尺桡关节进行生物力学评价相关的文献报道。

目的: 建立并验证下尺桡关节三维有限元模型, 用于临床的生物力学研究。

方法: 将1名健康男性志愿者右肱骨远端到腕关节中段的CT和MRI图像, 导入Mimics10.01和ANSYS10.0中, 建立下尺桡关节三维有限元模型, 模拟体外生物力学试验, 在横向拉伸、轴向压缩、旋前和旋后扭转4种工况下观测下尺桡关节各结构的应力分布, 所得结果与文献报道的生物力学实测数据比较验证。

结果与结论: 所构建的下尺桡关节有限元模型共有333 805个单元, 508 384个节点, 客观反映下尺桡关节真实解剖形态。所建模型在横向拉伸、轴向压缩、旋前和旋后扭转4种工况下, 理论分析结果与生物力学实测数据一致。证实所建的下尺桡关节有限元模型真实性较高, 可用于生物力学分析实验。

关键词: 下尺桡关节; 有限元; 三维模型; 生物力学; 数字化骨科技术

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2011.17.023

颜冰珊, 尹望平, 聂文忠, 黄煌渊, 朱梁豫. 正常下尺桡关节三维有限元模型的建立及验证[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(17):3135-3138. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

下尺桡关节是由尺骨头和桡骨乙状切迹构成的杵臼关节, 在维持前臂旋转功能及前臂力的传导中均起到重要作用; 关节脱位, 韧带损伤或前臂骨折等引起的下尺桡关节不稳, 是腕部疼痛的主要原因之一^[1]。近年来的生物力学实验对相关组织结构在维持下尺桡关节稳定性中所起的作用分别作了研究^[2], 但每个实验只能侧重于某一个方面, 无法在同一次生物力学实验中对各种组织结构进行检测。相比之下, 有限元分析具有一定的优越性^[3-5]。本文旨在建立一个正常下尺桡关节有限元模型并

加以验证, 为进一步的临床与实验研究提供基础。

1 对象和方法

设计: 单一样本观察。

时间及地点: 实验于2008-10/2009-04在复旦大学金山医院、上海交通大学机械与动力工程学院完成。

对象: 选择1名28岁健康男性志愿者作为研究对象, 年龄28岁, 体质量62 kg; 经X射线检查排除右上肢病变、损伤等情况, 试验方法及目的受试者知情同意, 试验方案得到批准。

¹ 复旦大学附属金山医院骨科, 上海市 200540; ² 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 200235; ³ 复旦大学附属华山医院骨科, 上海市 200040

颜冰珊★, 男, 1981年生, 福建省莆田市人, 汉族, 2009年复旦大学毕业, 硕士, 医师, 主要从事四肢及脊柱骨创伤研究。

通讯作者: 尹望平, 硕士, 主任医师, 副教授, 硕士生导师, 复旦大学附属金山医院骨科, 上海市 200540
ywp_2009@sina.com

中图分类号: R318
文献标识码: B
文章编号: 1673-8225 (2011)17-03135-04

收稿日期: 2010-12-18
修回日期: 2011-02-23
(20101218006/W·Z)

设备及软件:

设备及软件	来源
Somatom sensation 64 排螺旋 CT 机	Siemens, Erlangen, Germany
Symphony 1.5T 超导扫描仪	Siemens
医学建模软件 MIMICS 10.01	Materialise 公司
大型有限元软件 ANSYS10.0	ANSYS 公司, 美国

计算机配置: Inter Core2 Duo2.33 GHz双核 CPU、ATI Radeon HD 2600 PRO 256 M显卡、内存2 G。

实验方法:

原始数据的采集: 右前臂中立位, 自肱骨远端到腕关节中段分别做CT与MRI扫描。CT扫描层间距为0.3 mm, 长度334.5 mm, 共计1 116层图像, 以DICOM3.0标准直接储存; Siemens Symphony 1.5T 超导扫描仪, 扫描层距为1.6 mm, 0层间距, 共得到MRI图像160张, 同样储存备用。

三维有限元模型的建立:

数据的预处理及几何模型的建立: ①骨组织图像: 将CT图像的DICOM文件输入MIMICS10.01中, 应用MIMICS软件提取生成代表尺、桡骨、第5掌骨及腕骨外型轮廓的点, 连接骨组织轮廓线上相邻的3个节点建立三角面片, 进一步处理后建立下尺桡关节骨组织几何模型, 存为STL文件, 在ImageWare软件中建立骨组织曲面模型。②软组织图像: 把MRI图像的DICOM文件导入到MIMICS10.01软件中, 利用与骨组织相同的过程和方法建立骨间膜、旋前方肌、环状韧带、尺三角韧带、尺月韧带、尺侧副韧带、掌背侧尺桡韧带的模型。最后将建立的骨组织及软组织模型进行组装得到前臂中立位下尺桡关节几何模型^[6-8], 见图1。

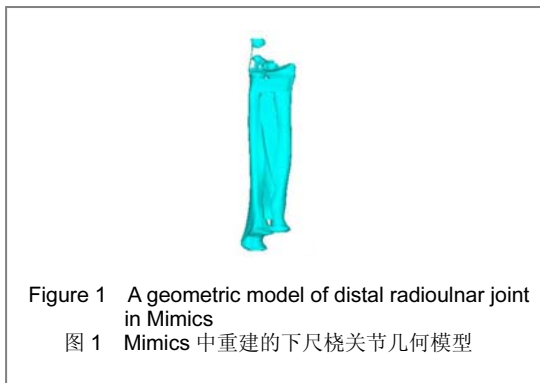


Figure 1 A geometric model of distal radioulnar joint in Mimics
图1 Mimics 中重建的下尺桡关节几何模型

下尺桡关节有限元模型的建立及相关组织的材料属性: 将完整的尺桡骨模型以IGES格式

导入到ANSYS10.0中, 建立有限元模型。采用Solid92实体单元对模型进行自由网格划分, 网格大小参数设置根据精细与运算时间兼顾的原则, 见图2。

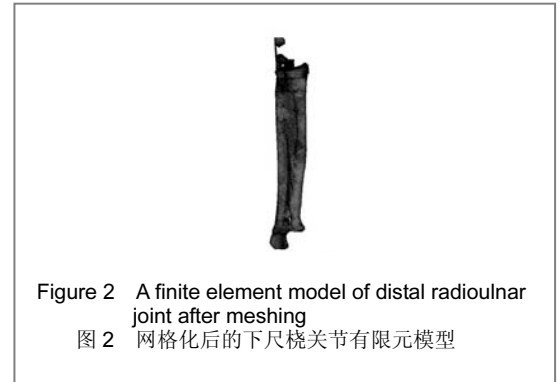


Figure 2 A finite element model of distal radioulnar joint after meshing
图2 网格化后的下尺桡关节有限元模型

各材料属性参考文献报道^[6-11], 见表1。

Material	Young's modulus (E, MPa)	Poisson's ratio
Carpal, radial and ulnar cortical bone	13 400	0.3
Radial and ulnar cancellous bone	1 700	0.3
Interosseous membrane	950	0.45
Pronator quadratus	5	0.48
Annular ligament	500	0.48
Palmar radioulnar ligament	39.3	0.48
Dorsal radioulnar ligament	51.8	0.48
Extensor retinaculum	500	0.48
Ulnotriquetral, ulnolunate ligament	500	0.48
Ulnar collateral ligament	500	0.48

边界条件的设定、加载方式及有限元分析:

边界条件: 前臂中立位下, 尺桡骨三维有限元模型近端截面的上尺桡切迹所有节点自由度(3个方向的位移, 3个方向的旋转)为零; 设定三角骨、第5掌骨及月骨所有节点的自由度为零。

加载方式: 横向拉伸、轴向压缩及旋前和旋后扭转4种方式加载。横向拉伸时尺桡骨腕关节横向表面为加载点, 大小为66.7 N; 轴向压缩方式腕关节横向表面为加载点, 大小为66.7 N; 扭转加载时载荷力大小为22 N的一对力偶, 尺骨固定, 分别施加于桡骨远端背侧旋前圆肌止点处及桡骨远端旋后肌止点处^[12-13]。

在ANSYS10.0中进行有限元计算, 得出相应的应力, 以等值线图的方式的显示生成应力分布规律云图。

主要观察指标: ①整个模型的形态。②在

横向拉伸、轴向压缩、旋前和旋后扭转4种工况下, 下尺桡关节不同组织结构的应力分布, 以及所得数据与文献报道数据比较的结果。

2 结果

2.1 模型的建立 整个模型(图2)共有333 805个单元, 508 384个节点; 包括尺骨、桡骨、第5掌骨、月骨和三角骨, 掌侧和背侧尺桡韧带、骨间膜、旋前方肌、尺月韧带、尺三角韧带、尺侧副韧带、伸肌支持带以及环状韧带; 尺骨和桡骨的远端内层包括松质骨, 其余的部分均视为皮质骨。

2.2 模型的有效性验证 由于涉及结构较多, 无法在同一次生物力学试验中进行所有验证, 故采用与多个文献已报道的下尺桡关节生物力学研究结果进行比较。

横向拉伸: ①旋前方肌应力分布最大, 表明旋前方肌具有维持下尺桡关节稳定作用; 这与Stuart等^[14]研究结果相似。②伸肌支持带、尺月韧带、尺三角韧带、尺侧副韧带上的应力分布, 与Palmer、Sasao等的研究结果相符^[15-16], 见图3。

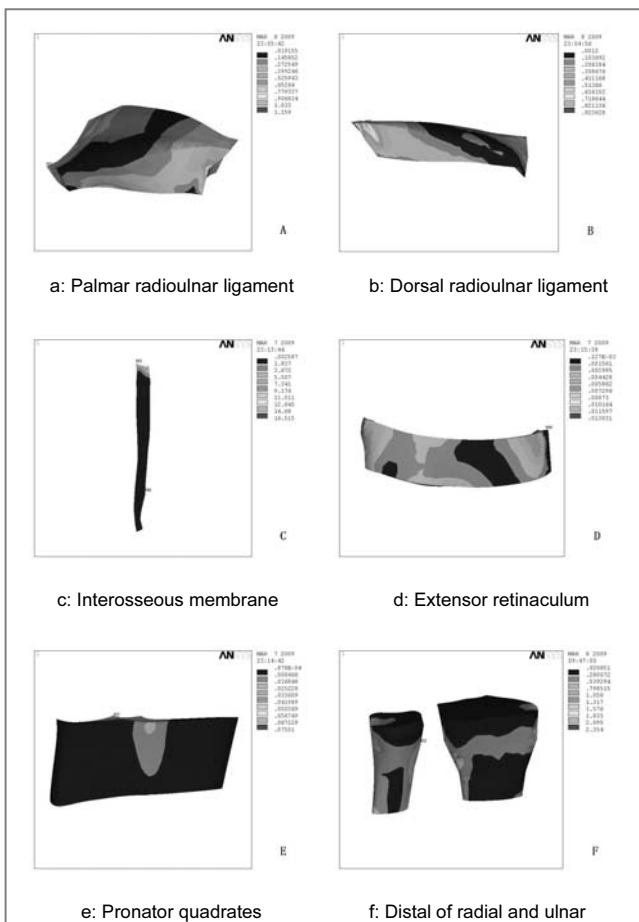


Figure 3 Under transverse tension, the distribution of stress of distal radioulnar joint
图3 横向拉伸工况下部分下尺桡关节稳定结构的应力分布图

轴向压缩工况下: ①桡骨关节处的应力分布远比尺骨关节面处的应力分布集中; 尺桡骨中段皮质骨应力分布最大, 两端较低; 松质骨上的最大应力集中在与皮质骨的交界面处。上述与Palmer、Shaaban等的研究结果一致^[17-18]。②骨间膜有轴向应力传导作用, 远端骨间膜和中间带上的应力较大, 与Watanabe等^[19]的研究相符, 见图4。

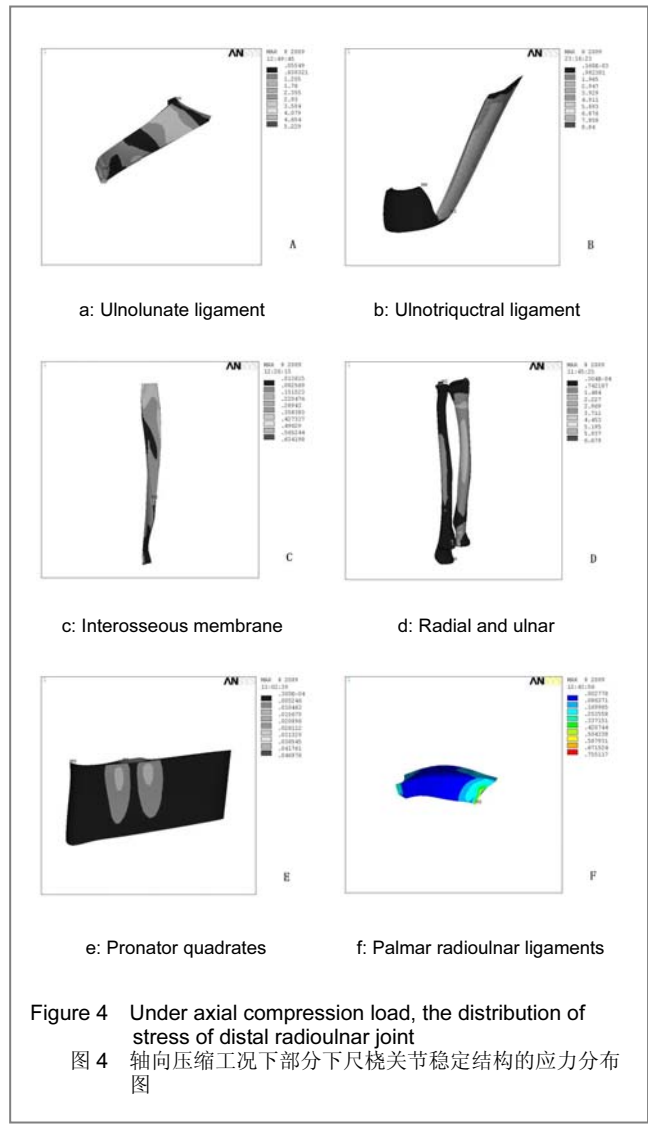
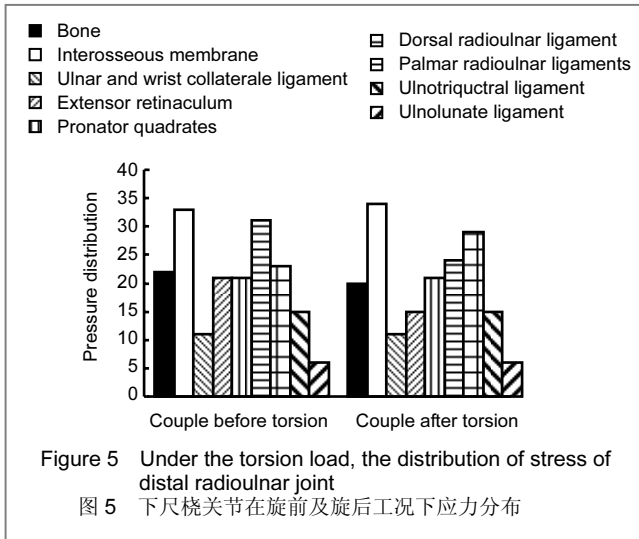


Figure 4 Under axial compression load, the distribution of stress of distal radioulnar joint
图4 轴向压缩工况下部分下尺桡关节稳定结构的应力分布图

旋前和旋后扭转载荷: 扭转应力工况下, 下尺桡韧带最大应力集中于韧带的尺骨茎突止点处。旋前时, 背侧尺桡韧带应力分布明显大于掌侧尺桡韧带应力分布; 旋后时, 掌侧尺桡韧带应力分布比背侧韧带应力分布大; 骨间膜和掌、背侧尺桡韧带是维持下尺桡关节稳定的主要因素, 结果与Schuind等^[20]和Kihara等^[13]研究相似。Stuart等^[21]研究提示, 相对于桡骨, 远端尺骨背侧移位的主要限制结构是掌侧尺桡韧带, 掌侧移位主要的限制结构是背侧尺桡韧带; 尺桡韧带在横向拉伸或旋后力偶时, 最大应力集中于韧带的尺骨茎突止点处, 也与本实验结果相同, 见图5。



3 讨论

3.1 本建模方法的优点 目前有关前臂有限元分析不多, 已有建立的模型相对较简单, 如未能对骨皮质和骨松质结构区分计算, 所用的CT扫描数据层间隔为1 mm, 或骨间膜及下尺桡韧带是采用直接建模法^[22-23]; 且还未见应用该方法对下尺桡关节进行生物力学评价相关的文献报道。本建模方法的优势: ①骨组织CT扫描层间距为0.3 mm, 所用数据更精确。②软组织结构(如旋前方肌、骨间膜等)采用MRI扫描所得图像, 比直接法更准确。③骨皮质、骨松质及相关的软组织, 采用不同的材料赋值, 所得的结果更接近真实。

本模型建立后, 参考以往的人体尸体模型的生物力学试验, 模拟下尺桡关节在横向拉伸、轴向压缩、旋前和旋后扭转4种工况下, 相关组织结构应力分布, 所得结果与文献报道相符。说明模型达到了设计要求, 可以应用于临床和实验研究。

3.2 本试验模型的目的意义和缺点 影响下尺桡关节的因素较多, 也存在着争论^[1-2], 例如对尺骨茎突骨折是否影响下尺桡关节不稳, 一些作者的结论会完全不同。本模型的应力分析可清楚地提示, 除了止于尺骨茎突的尺桡韧带外, 伸肌支持带、尺月韧带、尺三角韧带、尺侧副韧带和骨间膜等, 也是维持下尺桡关节稳定的重要结构, 这在临床医师处理该类骨折时最容易被忽视; 当然更深入的理解其中的关系有待于后续的研究。该模型形态结构与功能更接近实际情况, 对研究下尺桡关节乃至前臂的功能、相关的临床治疗方面, 有一定的价值。

模型的不足: 在MRI图像处理过程中, 所得的研究对象与其它组织相连续, 因此在建模过程中采用了人工修补方式; 在骨组织和软组织组装过程中, 参照了解剖学图谱进行人工组装; 这些有可能影响模型的精确性。

4 参考文献

- [1] Szabo RM. Distal radioulnar joint instability. *J Bone Joint Surg Am.*2006;88(4): 884-894.
- [2] Yan BS, Yin WP. *Zhonghua Chuangshang Zazhi.* 2009;25(7):670-672. 颜冰珊, 尹望平. 下尺桡关节的解剖学及生物力学研究进展[J]. *中华创伤杂志*, 2009, 25(7):670-672.
- [3] Tay SC, van Riet R, Kazunari T, et al. A method for in-vivo kinematic analysis of the forearm. *J Biomech.*2008;41(1):56-62.
- [4] Richmond BG, Wright BW, Grosse I, et al. Finite element analysis in functional morphology. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol.* 2005;283(2):259-274.
- [5] Rogge RD, Adams BD, Goel VK. An analysis of bone stresses and fixation stability using a finite element model of simulated distal radius fractures. *J Hand Surg (Am).*2002;27(1):86-92.
- [6] Chandler JW, Stabile KJ, Pfaeffle HJ, et al. Anatomic Parameters for Planning of Interosseous Ligament Reconstruction Using Computer-Assisted Techniques. *J Hand Surg (Am).*2003;28(1):111-116.
- [7] Starch DW, Dabezies EJ. Magnetic resonance imaging of the interosseous membrane of the forearm. *J Bone Joint Surg Am.* 2001;83(2):235-238.
- [8] Alcid JG, Ahmad CS. Elbow anatomy and structural biomechanics. *Clin Sports Med.*2004;23:503- 517.
- [9] Pena E, Calvo B, Marti nez MA, et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *J Biomechanics.*2006; 39(9):1686-1701.
- [10] Bosboom EM, Hesselink MK, Oomens CW, et al. Passive transverse mechanical properties of skeletal muscle under in vivo compression. *J Biomechanics.*2001;34(10):1365-1368.
- [11] Cheng HY, Lin CL, Lin YH, et al. Biomechanical evaluation of the modified double-plating fixation for the distal radius fracture. *Clin Biomechanics (Bristol, Avon).*2007;22(5):510-517.
- [12] Schuind F, An KN, Berglund L, et al. The distal radioulnar ligaments: A biomechanical study. *J Hand Surg (Am).* 1991;16(6):1106-1114.
- [13] Kihara H, Short WH, Werner FW, et al. The stabilizing mechanism of the distal radioulnar joint during pronation and supination. *J Hand Surg (Am).*1995;20(6):930-936.
- [14] Stuart PR. Pronator quadratus revisited. *J Hand Surg (Br).*1996; 21(6):714-722.
- [15] Palmer AK, Skahan JR, Werner FW, et al. The extensor retinaculum of the wrist: an anatomical and biomechanical study. *J Hand Surg (Br).*1985;10(1):11-16.
- [16] Sasao S, Beppu M, Kihara H, et al. An anatomical study of the ligaments of the ulnar compartment of the wrist. *Hand Surg.*2003; 8(2):219-226.
- [17] Palmer AK, Werner FW. Biomechanics of the distal radioulnar joint. *Clin Orthop.* 1984;(187):26-35.
- [18] Shaaban H, Giakas G, Bolton M, et al. The distal radioulnar joint as a load-bearing mechanism--a biomechanical study. *J Hand Surg (Am).*2004;29(1):85-95.
- [19] Watanabe H, Berger RA, Berglund LJ, et al. Contribution of the interosseous membrane to distal radioulnar joint constraint. *J Hand Surg (Am).*2005;30(6):1164 - 1171.
- [20] Schuind F, An KN, Berglund L, et al. The distal radioulnar ligaments: A biomechanical study. *J Hand Surg (Am).*1991;16(6):1106-1114.
- [21] Stuart PR, Berger RA, Linscheid RL, et al. The dorsopalmar stability of the distal radioulnar joint. *J Hand Surg (Am).*2000;25(4):689-699.
- [22] Su JC, Wang JL, Zhang CC, et al. *Zhongguo Linchuang Kangfu.* 2003;14(7):2012-2013. 苏佳灿, 王家林, 张春才, 等. 桡骨三维模型的建立及其生物力学意义[J]. *中国临床康复*, 2003, 14(7):2012-2013.
- [23] Cheng HY, Lin CL, Lin YH, et al. Biomechanical evaluation of the modified double-plating fixation for the distal radius fracture. *Clin Biomechanics (Bristol, Avon).*2007;22(5):510-517.

来自本文课题的更多信息--

作者贡献: 实验设计为第二作者, 干预实施为第一、三作者, 评估为第四、五作者。

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: 没有与相关伦理道德冲突的内容。