

关节盘前移位颞下颌关节仿真模型的建立

殷学民, 刘 啸, 张君伟, 徐国翔

(南方医科大学南方医院口腔颌面外科, 广东 广州 510515)

[摘要] 目的:通过 CT 及 MR 数据结合三维重建软件建立关节盘前移位颞下颌关节的数字化仿真模型。方法:根据马绪臣颞下颌关节病分类标准,选取成年颞下颌关节紊乱病志愿者 1 名,X 线片及 CT 检查排除颌骨疾患及颌面部肿瘤,MR 斜矢状位扫描明确右侧颞下颌关节盘分界角向前为 12.21° ,盘前分界超过关节结节顶点。通过 Simpleware 及 Ansys 等三维重建软件处理其右侧颞下颌关节的 CT 薄层扫描数据及 3D-MR 扫描数据,建立关节盘前移位颞下颌关节的数字化仿真模型。结果:建立了包括骨皮质、骨松质、软骨和关节盘在内的关节盘前移位颞下颌关节数字化仿真模型,客观反应了关节盘前移位时颞下颌关节的外形及解剖特点。结论:成功建立了关节盘前移位颞下颌关节的数字化仿真模型,为关节盘前移位的研究奠定了基础。

[关键词] 关节盘前移位; 颞下颌关节; 数字化仿真模型

[中图分类号] TP391.99;R782.6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-4979(2013)05-0336-05

doi: 10.3969/j.issn.1005-4979.2013.05.003

Establishment of a TMJ Digital Simulation Model with Anterior Disc Displacement

YIN Xue-min, LIU Xiao, ZHANG Jun-wei, XU Guo-xiang

(Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Nanfang Hospital, Nanfang Medical University,
Guangzhou 510515, Guangdong Province, China)

[Abstract] Objective: This study purposed to describe a TMJ digital simulation model with anterior disc displacement fabricated by three dimensional reconstruction technology. **Methods:** One volunteer with TMJ disorder was selected. X-ray and CT examination was performed to exclude related mandible diseases and tumors. The anterior disc displacement was diagnosed by oblique sagittal MR scanning which showed that the Drace was 12.21° and the plate boundary crossed the joint nodules. The digital simulation model was established by Simpleware and Ansys software on the basis of the imaging data obtained from the head spiral CT and 3D-MR scanning. **Results:** Digital simulation model of temporomandibular joint with anterior disc displacement which accurately showed their anatomic structures was successfully fabricated. **Conclusions:** The establishment of the digital simulation model of temporomandibular joint with anterior disc displacement is high precise and verisimilar, which can be widely applied in the biomechanical research.

[Key words] anterior disc displacement; temporomandibular joint; digital simulation model

颞下颌关节是颅颌面唯一的能动关节。在解剖形态上,髁突独特的关节面形态,非均匀厚度的关节盘及关节窝周围复杂的韧带肌群附着构成稳定而灵活的颞下颌关节;在生理功能上,颞下颌关节

的运动同时兼备转动和滑动功能,参与咀嚼、语言和表情等功能运动,同时颞下颌关节也一直被认为是颌面部重要的负重关节和缓冲结构^[1]。颞下颌关节紊乱病是颞下颌关节最常见的疾病,发病率约为 20%^[2]。其中关节盘前移位是最常见的关节结构紊乱,目前其病因及转归尚无明确定论。本研究利用三维重建软件重建关节盘前移位颞下颌关节的数字化模型,为关节盘前移位等颞下颌关节紊乱病的研究奠定基础。

收稿日期: 2013-02-21

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (S2011010003872); 广东省科技计划项目 (2012B031800144); 广州市科技计划项目 (12A72121503)

作者简介: 殷学民(1965—),男,江西人,教授,博士。

通信作者: 殷学民,教授。E-mail: yinxm@fimmu.com

1 材料和方法

1.1 关节盘前移位患者筛选

根据马绪臣颞下颌关节综合征分类标准^[3-4],筛选南方医科大学南方医院 1 名成年男性颞下颌关节紊乱病患者,26 岁,病史 6 个月,无系统治疗史。临床检查示:开口运动初始右侧颞下颌关节弹响,张口度正常,开口型偏向右侧后恢复正常,关节区轻微压痛。X 线及 CT 检查排除颌骨疾患及颌面部肿瘤,髁突形态完整。右侧颞下颌关节 MR 斜矢状位 T1W1 扫描示:右侧颞下颌关节盘形态尚完整,盘分界角向前为 12.21°,盘前分界超过关节结节顶点,符合关节盘前移位临床及影像学诊断标准。

1.2 影像学数据获取

64 层 CT 对右侧颞下颌关节连续水平扫描。扫描参数:层厚 0.5 mm,球管电流 200 mA,电压 120 kV;扫描范围:右侧颅底至右侧下颌骨乙状切迹平面,得到 232 层清晰的骨窗断层图像,所得图像以 DICOM 格式保存。

3D-MR 对右侧颞下颌关节连续斜矢状位扫描。扫描参数:层厚 0.5 mm,T1W1;扫描范围:右侧颅底至右侧下颌骨乙状切迹平面,得到 232 层清晰的断层图像,所得图像以 DICOM 格式保存。

1.3 重建软件

Simpleware 4.0 由英国 Simpleware 公司提供,Ansys 11.0 由美国安士公司提供。

1.4 重建方法

将 CT 及 MR 扫描的影像学数据导入 Simpleware 4.0 软件,利用软件自带的灰度划分功能选择重建区域,在 ScanIP 模块中利用 Floodfill(种子填充)分割算法对颞下颌关节实现不同解剖结构的图像分割,通过图像编辑功能对各个解剖结构边界进行添加或擦除,精细重建图像,在此基础上重建出右侧颞下颌关节的三维几何模型。

对该三维模型进行三维空间的精细化修整及表面光滑处理后,以 STL 格式保存并导入 Ansys 11.0 软件,使用 Remesh 的四面体结构网格划分功能对每一解剖结构进行面网格精度锐减等网格划分。根据现有文献及国际学者制定的标准,依次输入关节窝、髁突的骨皮质^[5-6]及骨松质^[7]、关节盘^[8-9]、软骨层^[10-11]的材料性质及材料参数(表 1);根据 Tanaka 等^[12-13]的研究标准,依次设定关节窝、髁突骨皮质与骨松质,关节窝、髁突的骨皮质与软骨层,关节盘与软骨层之间接触界面类型与摩擦参数(表 2),模拟颞下颌关节内各结构之间的位置关系和相互作用。

表 1 颞下颌关节材料参数

Table 1 Material properties used in the finite element model of temporomandibular joint

解剖结构	弹性模量 (MPa)	泊松比
下颌骨骨松质 ^[7]	7 930.00	0.30
下颌骨骨皮质 ^[5-6]	13 700.00	0.30
髁突软骨层(0.5 mm) ^[10-11]	0.79	0.49
关节盘 ^[8-9]	10.00	0.40
关节窝软骨层(0.5 mm) ^[10-11]	0.79	0.49
关节窝骨皮质 ^[5-6]	13 700.00	0.30

表 2 颞下颌关节各内部结构界面类型参数

Table 2 Interface parameters of temporomandibular joint

接触界面	接触类型	界面类型	界面意义	摩擦参数
骨皮质与骨松质	面-面接触单元对	绑定 (Bonded)	连接一体内部无摩擦及活动	无
骨皮质与软骨层	面-面接触单元对	不分离 (NoSeparation)	允许两者间无或有极小无摩擦的滑动	无
关节盘与软骨层	面-面接触单元对	有摩擦 (Frictional)	因摩擦系数而产生剪切等作用力	0.001 ^[14-15]

2 结果

所建立的关节盘前移位颞下颌关节的数字化生物力学模型包括了关节盘(图 1)、关节囊、关节窝、关节窝和髁突骨皮质及骨松质、软骨层(图 2)等重要解剖结构。其中关节盘不仅重建了中间带,还客观还原了关节盘前后带及与关节窝、髁突的附着结构,通过对上述解剖结构的匹配重组,完整建立关节盘前移位颞下颌关节的三维几何模型(图 3~4),并进行了解剖测量(表 3)。

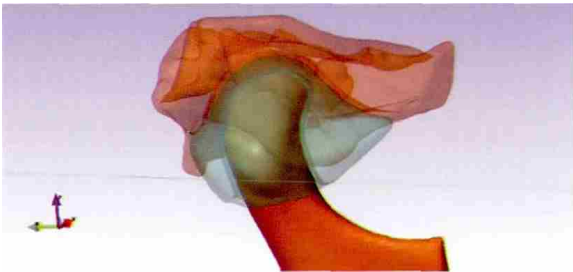


图 1 关节盘的三维模型
(蓝色:关节盘;棕色:上下颌骨骨皮质)
Figure 1 3-dimensional model of temporomandibular disc
(Blue: The disc; Brown: The cortical bone)

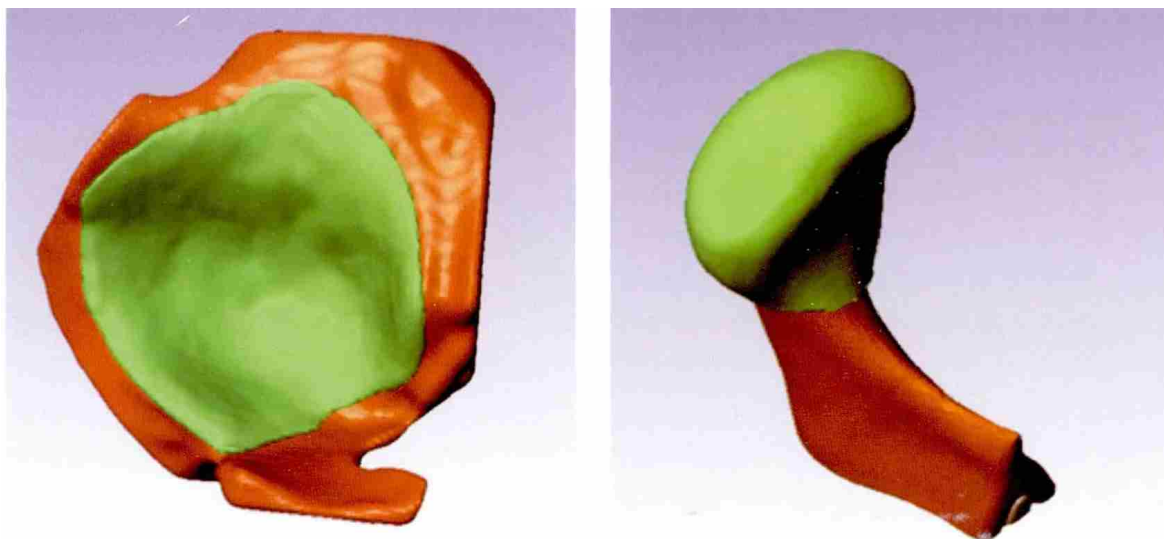


图 2 软骨层的三维模型

(绿色:关节窝软骨层;棕色:上下颌骨骨皮质)

Figure 2 3-dimensional model of cartilage layer

(Green: The cartilage layer of the fossa; Brown: The cortical bone)

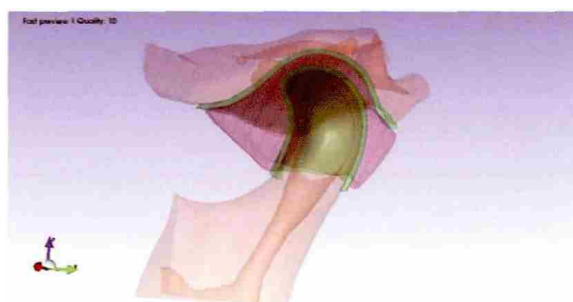


图 3 颞下颌关节仿真模型(牙尖交错位)

(粉色:关节盘;棕色:上下颌骨骨皮质;白色:下颌骨骨松质;
绿色:软骨层)Figure 3 3-dimensional model of temporomandibular joint
(intercuspal position)(Pink: The disc; Brown: The cortical bone; White: The cancellous bone;
Green: The cartilage layer)

图 4 颞下颌关节的三维模型(最大开口位)

(粉色:关节盘;棕色:上下颌骨骨皮质;白色:下颌骨骨松质;
绿色:软骨层)Figure 4 3-dimensional model of temporomandibular joint
(maximum mouth opening)(Pink: The disc; Brown: The cortical bone; White: The cancellous bone;
Green: The cartilage layer)

表 3 牙尖交错位颞下颌关节仿真模型解剖测量参数

Table 3 Anatomic data of temporomandibular joint

测量部位	多边形	多边形节点	体积(mm ³)	表面积(mm ²)
关节窝骨皮质	81784	40884	1732.0	2482.0
髁突骨皮质	74500	37250	1425.0	1684.0
髁突骨松质	26680	13342	585.8	602.3
关节窝软骨层	32940	16472	187.8	691.3
髁突软骨层	32352	16178	190.8	690.1
关节盘(牙尖交错位)	65612	32808	1943.0	1384.0
关节盘(最大张口位)	65612	32808	1702.0	1556.0
整体	392436	196234	7302.0	—

3 讨论

3.1 关节盘前移位的诊断标准

关节盘前移位的临床诊断主要有临床检查和影像学检查两种手段。临床诊断主要参照马绪臣颞下颌关节综合征分类标准,一般表现为关节开口运

动前中期出现明显弹响,开口型先偏向患侧后恢复正常,可伴有关节区压痛。但单纯临床症状在明确关节盘真实位置及功能运动方面有一定的局限性。MR是目前诊断关节盘移位与变形的最有效的影像学手段之一^[16]。Drace标准最为常用,盘分界角在闭口位斜矢状面T1W1上,关节盘后带和双板区之间有明显的分界线,与髁突12点位垂线所形成的夹角即为盘分界角。其在前10°之内,定义为正常盘突关系,向前超过盘分界角10°定义为关节盘前移。同时,盘前分界法即在闭口位斜矢状面T1W1上,关节盘前缘超过关节结节顶点,定义为关节盘前移。故关节盘前移位的诊断需要完善的临床检查和MR影像学检查^[17]。

3.2 三维有限元法在颞下颌关节领域中的应用

随着计算机技术与医学相结合,以三维有限元法为代表并广泛应用于工程技术领域的数字化技术,因能够对不规则几何形态和不同材料性质物体之间进行准确的数字化生物力学模拟与分析,为颞下颌关节运动的生物力学研究提供了一个更简便有效的研究方法和技术手段。

国内外学者通过三维有限元法对正常的颞下颌关节运动的机制进行了初步研究。Tanaka^[18-19]在记录颞下颌关节开颌运动轨迹后通过有限元分析发现,关节盘前后部都存在应力集中区域,认为关节盘具有缓冲和再分配压力的作用,通过对比关节盘移位后证实关节盘移位者在开颌运动时,关节盘前外侧部是应力集中的主要区域,提示关节盘移位所导致的关节接触面及摩擦系数改变,以及对周围软组织造成二次损伤是造成颞下颌关节紊乱的原因之一。Donzelli等^[20]采用MRI影像数据和激光定位技术获取颞下颌关节运动轨迹的方式,研究关节盘在开颌运动中的力学分布时发现,在小开颌运动时,关节盘出现应力分布不均匀现象,关节盘横向由外侧向内侧拉应力和剪切力逐步增大,并随着开颌时间的延长而趋向明显,提示关节盘的力学分布与关节盘穿孔部位有直接的关联。

目前的颞下颌关节生物力学研究还是主要针对正常状况下,颞下颌关节在功能颌位及运动过程中,通过对比颌位间及运动过程中颞下颌关节各个解剖结构间力学分布变化和趋势,研究正常颞下颌关节运动过程中的生物力学特征,借此推测病理状况下颞下颌关节解剖结构发生病变的力学因素。

但这些生物力学研究结果都缺乏病理状况下,尤其是关节盘前移位时关节盘生物力的直接性研究。

3.3 关节盘前移位颞下颌关节三维模型的意义

既往颞下颌关节的三维模型多简化关节盘及其周围复杂解剖形态,将关节盘视为一单一碟形结构,只重建中间带,而忽略关节盘在上下颌骨的附着,并将重点关注于中间带的应力变化和分布区域,达到理想的几何形态,方便生物力学的分析。但在临床研究中都指出,前移位的关节盘整体出现了包括双板区的拉伸折叠、前带的压缩扭曲、细胞结构上的改变^[21]以及髁突解剖结构和力学参数上^[22]的适应性变化,而关节盘穿孔更多出现在双板区而非中间带^[23];同时,Mori等^[24]通过加入简化关节盘附着的颞下颌关节有限元分析发现:关节盘近髁突面的中后部出现应力集中现象,同时髁突存在位移趋势,提示关节盘的附着对于限制关节盘过度移位有着重要的意义。所以,对前移位关节盘的生物力学研究,更应关注于关节盘各个部分不同方向应力的相互作用,以及关节盘的附着及周围肌肉韧带的限制导致关节盘相对于髁突、关节窝的不同位移的综合因素。

本研究所建立的颞下颌关节模型中完整重建了关节盘的整体形态,包括了关节盘在三维空间中的前后附着及关节囊结构,从而达到真实还原关节盘形态的目的。这种对关节盘整体的重建方法不但能够更加准确分析关节盘的空间形态,能够在满足对关节盘如中间带、前后附着、双板区及关节囊的不同部位的应力分析的条件下,进一步分析关节盘整体及不同部位间在不同方向上的位移差别对颞下颌关节的影响和关节盘的附着在颞下颌关节中所起到的作用。

3.4 不足与展望

本模型数据采集时所采用的3D-MR扫描层厚为0.5 mm,虽然在临床应用中对于关节盘前位移的临床诊断较为准确,但由于关节盘在三维空间上的厚薄不一,重建后的模型还原度上还有一定提高的空间,随着扫描技术和扫描精度提高,还能建立精度更高的模型。

参考文献:

- [1] Koolstra JH, Tanaka E. Tensile stress patterns predicted in the articular disc of the human temporomandibular joint

- [J]. *J Anat*, 2009,215(4):411-416.
- [2] Kalpakci KN, Willard VP, Wong ME, et al. An interspecies comparison of the temporomandibular joint disc[J]. *J Dent Res*, 2011,90(2):193-198.
- [3] 马绪臣,张震康. 颞下颌关节紊乱病的命名、诊断分类及治疗原则[J]. *中华口腔医学杂志*, 2002,37(4):241-243.
- [4] 马绪臣,张震康. 颞下颌关节紊乱综合征的命名和诊断分类[J]. *中华口腔医学杂志*, 1998,33(4):238-240.
- [5] Jafari A, Shetty KS, Kumar M. Study of stress distribution and displacement of various craniofacial structures following application of transverse orthopedic forces--a three-dimensional FEM study [J]. *Angle Orthod*, 2003,73(1):12-20.
- [6] Tanaka E, Sasaki A, Tahmina K, et al. Mechanical properties of human articular disk and its influence on TMJ loading studied with the finite element method [J]. *J Oral Rehabil*, 2001,28(3):273-279.
- [7] Singh M, Detamore MS. Tensile properties of the mandibular condylar cartilage [J]. *J Biomech Eng*, 2008,130(1):11009-11017.
- [8] Beek M, Koolstra JH, van Ruijven LJ, et al. Three-dimensional finite element analysis of the human temporomandibular joint disc [J]. *J Biomech*, 2000,33(3):307-316.
- [9] Tanaka E, Tanaka M, Miyawaki Y, et al. Viscoelastic properties of canine temporomandibular joint disc in compressive load-relaxation [J]. *Arch Oral Biol*, 1999,44(12):1021-1026.
- [10] Beek M, Koolstra JH, van Ruijven LJ, et al. Three-dimensional finite element analysis of the cartilaginous structures in the human temporomandibular joint [J]. *J Dent Res*, 2001,80(10):1913-1918.
- [11] Tanaka E, Tanne K, Sakuda M. A three-dimensional finite element model of the mandible including the TMJ and its application to stress analysis in the TMJ during clenching [J]. *Med Eng Phys*, 1994,16(4):316-322.
- [12] Abe S, Kawano F, Kohge K, et al. Stress analysis in human temporomandibular joint affected by anterior disc displacement during prolonged clenching [J]. *J Oral Rehabil*, 2013,40(4):293-246.
- [13] Hirose M, Tanaka E, Tanaka M, et al. Three-dimensional finite-element model of the human temporomandibular joint disc during prolonged clenching [J]. *Eur J Oral Sci*, 2006,114(5):441-448.
- [14] Mori H, Horiuchi S, Nishimura S, et al. Three-dimensional finite element analysis of cartilaginous tissues in human temporomandibular joint during prolonged clenching [J]. *Arch Oral Biol*, 2010,55(11):879-886.
- [15] Hirose M, Tanaka E, Tanaka M, et al. Three-dimensional finite-element model of the human temporomandibular joint disc during prolonged clenching [J]. *Eur J Oral Sci*, 2006,114(5):441-448.
- [16] Emshoff R, Rudisch A, Innerhofer K, et al. Magnetic resonance imaging findings of internal derangement in temporomandibular joints without a clinical diagnosis of temporomandibular disorder [J]. *J Oral Rehabil*, 2002,29(6):516-522.
- [17] Dias IM, Coelho PR, Assis NM, et al. Evaluation of the correlation between disc displacements and degenerative bone changes of the temporomandibular joint by means of magnetic resonance images [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2012,41(9):1051-1057.
- [18] Tanaka E, Rodrigo DP, Tanaka M, et al. Stress analysis in the TMJ during jaw opening by use of a three-dimensional finite element model based on magnetic resonance images [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2001,30(5):421-430.
- [19] Tanaka E, del Pozo PR, Tanaka M, et al. Three-dimensional finite element analysis of human temporomandibular joint with and without disc displacement during jaw opening [J]. *Med Eng Phys*, 2004,26(6):503-511.
- [20] Donzelli PS, Gallo LM, Spilker RL, et al. Biphasic finite element simulation of the TMJ disc from in vivo kinematic and geometric measurements [J]. *J Biomech*, 2004,37(11):1787-1791.
- [21] Clément C, Bravetti P, Plénat F, et al. Quantitative analysis of the elastic fibres in the human temporomandibular articular disc and its attachments [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2006,35(12):1120-1126.
- [22] Lee JY, Kim DJ, Lee SG, et al. A longitudinal study on the osteoarthritic change of the temporomandibular joint based on 1-year follow-up computed tomography [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2012,40(8):e223-e228.
- [23] Liu XM, Zhang SY, Yang C, et al. Correlation between disc displacements and locations of disc perforation in the temporomandibular joint [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2010,39(3):149-156.
- [24] Mori H, Horiuchi S, Nishimura S, et al. Three-dimensional finite element analysis of cartilaginous tissues in human temporomandibular joint during prolonged clenching [J]. *Arch Oral Biol*, 2010,55(11):879-886.