

Three-Dimensional Reconstruction and Finite Element Analysis in TMJ Imaging

Siyi Tong¹, Hong He^{1,2*}, Xueting Wang¹, Jiejun Shi^{1,2}, Xudong Ma³

¹The Affiliated Stomatology Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou Zhejiang

²Key Laboratory of Oral Biomedical Research of Zhejiang Province, Hangzhou Zhejiang

³Huzhou University, Huzhou Zhejiang

Email: honghehh@zju.edu.cn, 415096251@qq.com

Received: Nov. 27th, 2019; accepted: Dec. 10th, 2019; published: Dec. 17th, 2019

Abstract

Background: The structure and dynamic biomechanics of temporomandibular joint are complex. Three-dimensional reconstruction and finite element analysis can help us understand its dynamic structure and stress distribution, hence providing a new idea for clinical diagnosis and treatment of TMD. **Objective:** To summarize the research status and progress of three-dimensional reconstruction and finite element analysis for TMJ imaging. **Methods:** The words “temporomandibular joint, 3D reconstruction, finite element” in Chinese and the words “TMJ, 3D reconstruction, finite element” in English were used as keywords to search relevant literatures from CNKI, Wanfang database, PubMed and Web of Science. 56 articles were obtained in the preliminary examination, and 28 of them were adopted to be analyzed and studied after screening. **Results and Conclusion:** Under normally and differently dynamic or variously pathological conditions, once different concentrations of stress are shown in the condyle, articular disk or articular fossa of TMJ in the imaging model, it would indicate potential lesions as TMD. The development of TMJ 3d reconstruction model is becoming more and more accurate and true based on the combination of CT and MRI, facilitating a complete illustration for the anatomy and dynamic functional structure of TMJ and related maxillary and mandibular regions.

Keywords

Temporomandibular Joint, Temporomandibular Disorders, Medical Imaging, Three-Dimensional Reconstruction, Finite Element Analysis

TMJ影像学三维重建与有限元应力分析浅述

童思熠¹, 何虹^{1,2*}, 王雪婷¹, 施洁璐^{1,2}, 马旭东³

¹浙江大学医学院附属口腔医院, 浙江 杭州

*通讯作者。

²浙江省口腔生物医学研究重点实验室, 浙江 杭州

³湖州大学, 浙江 湖州

Email: honghehh@zju.edu.cn, 415096251@qq.com

收稿日期: 2019年11月27日; 录用日期: 2019年12月10日; 发布日期: 2019年12月17日

摘要

背景: 颞下颌关节的结构及其动态生物力学复杂, 通过影像学三维重建及有限元应力分析可帮助了解其动态结构和应力分布, 为TMD的临床诊治提供新的思路。**目的:** 总结TMJ影像学三维重建及有限元应力分析的研究现状及进展。**方法:** 以“颞下颌关节, 三维重建, 有限元”“TMJ, 3D reconstruction, finite element”为关键词, 检索CNKI、万方数据库、PubMed、Web of Science数据库的相关文献。初检得到中英文文献56篇, 筛选后对其中28篇文献进行分析和学习。**结果与结论:** 在正常不同动态及多种病理情况下, TMJ的髁突、关节盘、关节窝在影像模型中如果出现不同的应力集中区域, 预示易发生病变。基于CT和MRI的数字化联合, TMJ三维重建模型的发展, 越来越精准和真实, 能够完整地再现TMJ及其相关上下颌骨区域的解剖和动态功能性结构。

关键词

颞下颌关节, 颞下颌关节紊乱病, 医学影像学, 三维重建, 有限元分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颞下颌关节(temporomandibular joint, TMJ)是人体中最复杂的关节之一, 其解剖结构包括颞骨关节面(含关节窝和关节结节)、髁突、关节盘、关节囊和关节韧带。TMJ左右联动, 行使着咀嚼、吞咽、语言、表情等复杂的生理功能[1]。

颞下颌关节紊乱病(temporomandibular disorders, TMD)累及颞下颌关节和(或)咀嚼肌系统, 并带来相关临床问题(比如疼痛、弹响、开口受限等) [2]。TMD在人群中的患病率约为20%~93% [3]。目前发病原因尚未完全阐明, 可能与牙合因素、精神心理因素、创伤因素、自身免疫因素、解剖因素等有关[4]。TMD可分为结构紊乱疾病、咀嚼肌紊乱疾病、关节炎症性疾病、和骨关节病四类[5], 其中关节结构紊乱疾病又称关节内紊乱或内错乱症(internal derangement, ID), 是TMD中构成比最高的一类, 约占69% [6] [7]。随着医学影像学和计算机技术的不断发展, 我们对TMJ的结构和应力分布有了更进一步的认识, 为TMD的诊治提供了新的思路。文章将浅述TMJ三维重建的方法及不同状态下TMJ的应力分布。

2. 资料与方法

2.1. 资料选取

以“颞下颌关节, 三维重建, 有限元”“TMJ, 3D reconstruction, finite element”为关键词, 中文检索策略:(颞下颌关节) AND (三维重建 OR 有限元), 英文检索策略:(TMJ) AND (3D reconstruction OR finite

element), 检索 2000 至 2018 年间 CNKI、万方数据库、PubMed 数据库以及 Web of Science 数据库的相关文献。

2.2. 纳入与排除标准

纳入标准：根据文章题目及摘要进行初步筛选，通过文献精读和泛读后提炼出与文章相关的研究原著、综述及论著。

排除标准：研究目的及内容与此研究无关的文献；重复性研究。

2.3. 文献质量评估

根据文献摘要进行初级筛选，初筛得到文献 56 篇，按照选取条件及排除条件进行初筛。排除与此次研究主题无关及重复性研究文献，纳入研究的文献包括临床研究、基础研究、综述等。文献检索流程见图 1。最终选择 28 篇文献纳入综述。

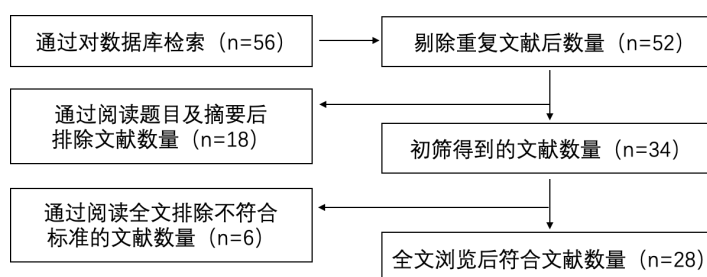


Figure 1. Literature search process
图 1. 文献检索流程

3. 结果

3.1. TMJ 三维影像有限元建模

医学影像学在多种颞下颌关节疾病的诊断中具有重要的价值[8]。近年来，随着传统 X 线检查方法的不断改进，现代医学影像学(CT、MRI 等)的迅速发展，TMJ 的影像学检查内容得到了极大的丰富[9]。而基于影像学图像进行的 TMJ 三维重建，能够帮助我们更好地认识 TMJ，研究其运动和生物力学，为临床 TMD 的诊治提供依据[10]。

3.1.1. TMD 中 CT 与 MRI 影像的联合应用

八十年代初 CT 开始用于 TMJ 病变的检查，可观察关节结节和关节窝形态、位置及骨质结构改变，髁突骨质形态、边缘、解剖结构和活动范围等，并进行关节间隙、髁状突水平角、垂直倾斜角及内外前后径等的测量[11]。有研究显示，TMJ 的 CT 影像测量具有和常规测量一样的准确性，且与常规测量结果呈正相关[12] [13]。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术是目前 TMD 的首选检查方法之一，也是观察关节盘的金标准[14]，具有无创、无辐射、对 TMJ 各解剖结构显示清晰等优点。CT 和 MRI 对于 TMJ 软组织的成像各有优劣，将两者结合可以较好地还原 TMJ 的真实形态和结构。

3.1.2. 三维影像有限元应力模型

上个世纪八十年代，就有学者开始了 TMJ 的三维影像重建[15]。随后有学者在此基础上利用三维有限元法(finite element method, FEM)对 TMJ 进行生物力学研究。有限元法是指将连续的弹性体分割成有限个单元，以其结合体来替代原弹性体，并逐个地研究每个单元的性质，以获得整个弹性体的力学分析方

法[16], 在生物力学研究中有着广泛的应用。Maure 等[17]认为: 有限元法适用于颌面部骨组织复杂的机械应力分析, 既节约时间, 又结果可靠。有限元模型建模主要有以下五种方法: 一、磨片/切片法; 二、三维测量法; 三、CT 或 MRI 图像处理法; 四、DICOM 数据建模法; 五、数字化虚拟人的建模方法[18]。

CT 或 MRI 图像处理法建模过程如下: 首先对研究对象进行 CT 或 MRI 扫描, 获得原始的二维数据; 其次将 CT 或 MRI 胶片通过扫描、摄像等方法输入计算机, 获得二维图像; 然后在图像分析软件中获取图像边界数据; 最后将获得的数据输入三维有限元分析软件中进行处理, 最终获得三维有限元模型。上个世纪九十年代, 国内有学者开始了 TMJ 三维重建的研究。早期的研究多依赖于 CT 或 MRI 的单一成像, TMJ 的部分结构需要人为地进行模拟, 从而影响了模型的真实性和准确性[15] [19] [20] [21]。2008 年, 林有籁等通过人造球形标记的配准, 利用 CT 和 MRI 医学图像融合技术, 进行了包括关节盘、关节窝、下颌骨和下牙列在内的 TMJ 的三维重建, 所建立的模型具有良好的几何相似性。此后又有学者进行了 TMJ 三维模型的动态研究, 分析其解剖结构、运动规律及形态变化。随着图像采集、分析、处理、配准等技术的发展[22] [23], 时至今日, 基于 CT 和 MRI 影像的 TMJ 三维重建模型已越来越精准、真实, 能够完整地再现 TMJ 及相关上下颌骨区域的解剖结构[24] [25]。

3.2. TMJ 三维有限元病理性应力模型构建

在此基础上, 不少学者对正常及多种病理情况下的 TMJ 进行了应力分析, 为临床 TMD 的发生、诊断、治疗提供了新的思路。

在关于关节盘移位时 TMJ 的力学研究中, 刘啸[26]通过建立关节盘前移位、牙关紧闭位及最大张口位的数字化模型, 采用有限元法进行生物力学分析, 获得关节盘、髁突等 TMJ 各个解剖结构的力学分布变化和趋势, 发现关节盘前移位时正常关节盘中间带向前移位, 其与后带前部交界区域代替正常关节盘功能面结构, 形成“假性关节盘”, 出现应力集中区, 为关节盘穿孔的好发部位。赖林锋等[27] [28]通过构建单侧不可复性盘前移位患者的 TMJ 个体化三维数字模型发现正常关节盘的应力集中在中带外侧部, 分布较均匀, 当关节盘前移位时, 中带出现应力集中现象, 易引起该部位关节盘变薄或穿孔; 正常髁突表面应力主要分布在前斜面, 当关节盘前移位时, 髁突受力增大, 易发生退行性变; 且关节紊乱会导致关节摩擦系数增大, 而摩擦系数增大又会促进 TMD 的发展。刘展等[29]则模拟关节盘前、后、内、外四种移位的情况, 建立了对应的四个模型, 发现各种移位都将导致关节盘和关节结节后斜面产生过高应力, 且后、内、外移位更危险。

在对偏颌患者 TMJ 的生物力学分析中, 倪峰等[30]发现关节盘和关节窝的主要受力在偏斜对侧分布偏内, 偏斜侧分布偏外; 应力在偏斜对侧是一种集中的方式, 偏斜侧是一种分散的方式。偏颌患者偏斜侧关节盘可能倾向于向外侧移位, 偏斜对侧关节盘可能倾向于向内侧移位。王政宪[31]通过构建 TMJ 正常生物力学参数数据库和旋转加力-旋转前移加力盘髁关系三维模型数据库及对比分析, 得出了相似的结论。

此外还有不少学者通过三维重建和有限元法对大张口[32] [33]、紧咬牙[34]、反合[35] [36]等多种情况下 TMJ 的受力和运动情况进行了分析, 为 TMD 的发生和诊治提供新的依据。

4. 展望

TMJ 解剖和动态结构复杂, 它兼有包括软硬组织, CT 和 MRI 的单一成像难以完整呈现 TMJ 的三维动态结构, 将两者结合则能帮助我们更真实、详尽地还原 TMJ 的动态结构。TMD 在人群中的发病率高, 病因尚未完全明确, 基于三维模型的有限元分析让我们了解不同状态下 TMJ 的应力分布, 对 TMD 的发病机制有了更进一步探讨的依仗工具。相信随着医学影像学和计算机技术的不断发展, 我们对 TMJ 会有

更深入的认识,对TMD的防治也会有更好的方法。

基金项目

浙江大学医学院教学改革课题 yxyb20172030; 卫计委省部共建基金 WKJ-ZJ-1623; 卫计委公益性行业专项基金 201502018; 国家重点研发计划合作项目 2016YFC0902702。

参考文献

- [1] 皮昕. 口腔解剖生理学[M]. 第7版. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 111.
- [2] Okeson, J.P. (1996) *Orofacial Pain: Guidelines for Assessment, Diagnosis, and Management*. Elsevier, Amsterdam, 131-134.
- [3] 王艺, 马绪臣, 李琛, 等. 北京市 1006 人颞下颌关节紊乱病患状况调查[J]. 现代口腔医学杂志, 2000, 14(2): 113-116.
- [4] 张震康, 谷志远, 傅开元. 颞下颌关节紊乱病的病因学说[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 76-102.
- [5] 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.
- [6] 张志愿. 口腔颌面外科学[M]. 第7版. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 384.
- [7] 王艺, 马绪臣, 赵燕平. 颞下颌关节紊乱病新分类在我国临床适用情况[J]. 现代口腔医学杂志, 2001, 15(4): 283-286.
- [8] 马绪臣. 口腔颌面医学影像诊断学[M]. 第6版. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 185.
- [9] 曹鸿涛. 颞下颌关节的放射影像学检查新进展[J]. 口腔医学, 2002, 17(2): 24-26.
- [10] 林有籁, 刘月华, 王冬梅, 等. CT 和 MRI 图像融合三维重建颞下颌关节的研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2008, 26(2): 140-143.
- [11] 马国林, 刘亚武, 祁吉. 颞下颌关节病变的 CT 检查[J]. 现代口腔医学杂志, 2001, 15(2): 147-148.
- [12] 孟凡文, 胡开进, 宁文德, 等. 颞下颌关节 CT 影像测量与解剖测量相关性研究[J]. 口腔医学研究, 2005, 21(6): 618-621.
- [13] 范光碧, 汤华军. 颞下颌关节 CT 影像测量与解剖测量的相关性分析[J]. 中国社区医师, 2016, 32(20): 7+9.
- [14] 孙琦, 余强. 颞下颌关节 MRI 技术的应用和进展[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2011, 9(1): 79-83.
- [15] 胡敏, 周继林, 洪民, 等. 颞下颌关节三维影像重建与显示[J]. 解放军医学院学报, 1995(4): 256-259.
- [16] 艾林, 丁伟, 倪龙兴. 有限元法与口腔生物力学[J]. 临床口腔医学杂志, 2005, 21(5): 318-319.
- [17] Maurer, P., Knoll, W.D. and Schubert, J. (2003) Comparative Evaluation of Two Osteosynthesis Methods on Stability Following Sagittal Split Ramus Osteotomy. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **31**, 284-289. [https://doi.org/10.1016/S1010-5182\(03\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S1010-5182(03)00073-8)
- [18] 盛潇, 朱敏. 颞下颌关节三维有限元建模方法进展[J]. 口腔颌面外科杂志, 2011, 21(1): 68-71.
- [19] 杨辉, 刘洪臣, 荣起国. 颞下颌关节三维有限元模型的建立[J]. 中华口腔医学杂志, 1999, 34(5): 63.
- [20] 周学军, 赵志河, 赵美英, 等. 包括下颌骨的颞下颌关节三维有限元模型的建立[J]. 实用口腔医学杂志, 2000, 16(1): 17-19.
- [21] 胡凯, 刘洪臣, 方竞, 等. 探讨人颞下颌关节三维有限元的实体建模方法[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2000, 1(1): 26-28.
- [22] 刘建林, 付崇建. 颞下颌关节三维动态数据测量的初步研究[J]. 中华老年口腔医学杂志, 2016, 14(3): 171-176.
- [23] Li, Q., Shuang, R., Cheng, G., et al. (2014) Effect of Jaw Opening on the Stress Pattern in a Normal Human Articular Disc: Finite Element Analysis Based on MRI Images. *Head & Face Medicine*, **10**, 1-9. <https://doi.org/10.1186/1746-160X-10-24>
- [24] 丁月峰, 周培刚, 费学东. 多种软件和图像联合技术构建个体化颞下颌关节三维有限元模型的初步研究[J]. 口腔颌面外科杂志, 2014, 24(2): 108-112.
- [25] Alsaleh, M.A., Punithakumar, K., Lagravere, M., et al. (2017) Three-Dimensional Assessment of Temporomandibular Joint Using MRI-CBCT Image Registration. *PLoS ONE*, **12**, e0169555. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169555>
- [26] 刘啸. 关节盘前位移颞下颌关节生物力学研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2013.

- [27] 赖林锋, 方一鸣, 吴立军. 不可复性关节盘前移位的颞下颌关节系统生物力学研究[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2013, 11(5): 382-387.
- [28] 赖林锋, 方一鸣, 吴立军, 熊国锋. 关节腔内摩擦系数对颞下颌关节系统生物力学特性的影响[J]. 中国现代医生, 2017, 55(32): 19-22.
- [29] 刘展, 钱英莉, 张远理, 等. 关节盘移位对颞下颌关节内应力分布的影响[J]. 医用生物力学, 2013, 28(5): 528-532.
- [30] 倪峰, 丁寅, 刘莹, 等. 骨性偏颌患者颞下颌关节的生物力学分析[J]. 实用口腔医学杂志, 2012, 28(3): 359-363.
- [31] 王政宪. 正常(牙合)与偏(牙合)条件下颞下颌关节结构三维模型建立及对比研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [32] Sun, M., Yang, J., Zhou, R., *et al.* (2015) Mechanical Analysis on Individualized Finite Element of Temporal-Mandibular Joint under Overlarge Jaw Opening Status. *International Journal of Clinical & Experimental Medicine*, **8**, 9046.
- [33] 孙明旭. 大张口状态颞下颌关节的生物力学研究和流行病学调查[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [34] Kazuhiro, M., Kazuhiko, Y., Tsutomu, S., *et al.* (2013) Effect of Clenching on Biomechanical Response of Human Mandible and Temporomandibular Joint to Traumatic Force Analyzed by Finite Element Method. *Medicina Oral Patologia Oral y Cirugia Bucal*, **18**, e473-e478. <https://doi.org/10.4317/medoral.18488>
- [35] 林有籁, 刘月华, 王冬梅, 等. 个别后牙反(牙合)对颞下颌关节应力影响的三维有限元研究[J]. 中华口腔医学杂志, 2013, 48(2): 86-90.
- [36] 周子凌, 张渊, 石利强, 等. 咬合接触对颞下颌关节应力分布影响的三维有限元分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2015, 50(5): 302-306.