

Digital Anatomy on of Masticatory System Including Full Teeth Structure

Pengcheng Ye¹, Jianfeng Guan¹, Kai Chen¹, Linlin Zhang¹, Lijun Wu^{2*}, Yiming Fang^{1*}

¹Department of Oral and Maxillofacial Surgery, The First Affiliated Hospital, Wenzhou Medical University, Wenzhou Zhejiang

²Institute of Digitized Medicine, Wenzhou Medical University, Wenzhou Zhejiang

Email: *biomech@163.com, *fangyiming2003@sina.com

Received: Nov. 14th, 2015; accepted: Dec. 2nd, 2015; published: Dec. 7th, 2015

Copyright © 2015 by authors 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

Abstract

Objective: To discuss feasibility of constructing masticatory system including full teeth structure, temporomandibular joint and craniomaxillofacial structure based on imaging and anatomy. To prepare for defining the material properties on constructing the 3-D FEM of masticatory system by means of Ansys and to provide new ideas of modeling for research on biomechanics of the craniomaxillofacial structure. **Methods:** CT machine and MRI machine were used to scan the skull, masticatory muscles and bilateral temporomandibular joint in the second generation No. 23 of Chinese virtual human. CT and MRI image data in format of DICOM were in batches imported into Mimics to reconstruct 3-D model, then integrating and optimizing the models, constructing model of the masticatory system including full teeth structure by geomagic stadio. **Results:** A 3-D model of the masticatory system including full teeth structure, enamel, cementum, dentin, dental pulp, periodontal ligament, mandibular, maxillary, temporomandibular joint, craniomaxillofacial structure is constructed. **Conclusions:** It is precise and feasible to construct a 3-D model of the masticatory system including full teeth structure based on CT images, MRI images and anatomy by means of Mimics and Geomagic Stadio. This model can restore the biomechanics environment of the masticatory system, and provide new ideas of modeling for research on biomechanics of the masticatory system.

Keywords

Digital Anatomy, Masticatory System, Tooth, Cortical Bone Thickness, Measurement, Temporomandibular Joint

*通讯作者。

咀嚼系统包括全牙列精细结构的数字解剖学建模研究

叶鹏程¹, 管建锋¹, 陈 凯¹, 张琳琳¹, 吴立军^{2*}, 方一鸣^{1*}

¹温州医科大学附属第一医院口腔颌面外科, 浙江 温州

²温州医科大学数字化医学研究所, 浙江 温州

Email: *biomech@163.com, *fangyiming2003@sina.com

收稿日期: 2015年11月14日; 录用日期: 2015年12月2日; 发布日期: 2015年12月7日

摘 要

目的: 探讨建立包括上下颌骨双皮质层、牙髓、牙本质、牙骨质、牙釉质、牙周膜及颅颌面咬合三维解剖学模型的可行性, 为后期导入Ansys软件定义各组织的材料属性建立系统的三维有限元模型做准备, 以及为研究颅颌面、颞下颌关节及牙齿的生物力学特性提供建模思路。**方法:** 采集第二代中国虚拟人男性第23号头颅CT图像、咀嚼肌MRI图像及双侧颞下颌关节盘MRI图像, 以DICOM格式导入Mimics软件进行三维重建, 再通过Geomagic-Studio软件配准模型、优化模型及构建咀嚼系统包含牙体牙周精细模型。**结果:** 建立了一个包含上颌骨双皮质层、下颌骨双皮质层, 全牙列以及颞下颌关节骨骼肌肉系统和颅颌面的三维解剖学模型。**结论:** 基于CT、MRI影像和解剖学, 利用医学影像处理软件Mimics、Geomagic-Studio可以精确、可行地构建包含全牙列精细结构和颞下颌关节骨骼肌肉咬合系统及颌面部的三维解剖学模型。该模型更加真实的还原了颌面部咬合系统的生物力学环境, 为咬合系统骨骼肌肉协调功能的生物力学研究提供了新的建模方法和思路。

关键词

数字解剖学, 咀嚼系统, 牙列, 皮质骨厚度, 颞下颌关节

1. 引言

将咀嚼肌, 颞下颌关节, 颌骨, 牙, 牙周组织及其有关的神经血管, 视为发挥咀嚼功能的统一整体, 简称咀嚼系统(masticatory system) [1]。咀嚼系统结构极为复杂和精细, 为了研究不同咬合状态下口腔各解剖结构的生物力学环境, 三维有限元法仍是目前最常用并有效的方法之一[2]。有限元建模步骤包括: 数据获取, 三维模型的拟合及有限元模型的建立, 而数据建模是三维有限元分析的决定因素[3]。因此, 提高建模的精确度和全面性能提高模型分析的准确度。前人在咀嚼系统三维有限元建模的上做了大量工作, 王疆[4]利用 Mirco-CT 扫描离体牙建立了牙体的高精度模型, 分析单个牙体的生物力学环境, 刘梦超等[5]利用扫描活体人的头颅 CT 及 MRI, 用 DICOM 数据建立颞下颌关节模型, 分析了关节盘的生物力学, 沈晓[6]扫描正常人颌面 CT, 以 DICOM 数据模拟病态的牙列在矫治中的生物力学, 王慧媛[7]扫描正常人颌面 CT, 以 DICOM 数据模拟不同牙周膜病态下的生物力学。但由于建模方法的差异和建模针对性不同, 不能完整展现整个咀嚼系统, 使得其适用性上有一定局限性。而将精细的全牙列, 颞下颌关节, 咀嚼肌和颌骨模型完整建立的三维解剖学模型更是少之又少。本实验选取标准严格的活体人以高精度 CT 扫描全头颅, 再结合 MRI 弥补 CT 中的软组织显影误差, 最后以 DICOM 数据建模, 保证了咀嚼系统的

完整性和精确性，完整还原咀嚼系统的生物力学环境。

2. 材料方法

2.1. 志愿者基本情况

志愿者纳入条件：20 岁左右青壮年成人；否认颞下颌关节病史，无开口不适，无开口弹响，张口度及张口型正常，无关节区自发及痛压痛；头面部无外伤史，面型对称，比例协调；牙列完整，无龋病，牙龈色性质正常，牙齿无松动；无风湿、类风湿病史及其他系统性疾病。排除标准：正畸史，拔牙史，牙周手术史，颌面部手术史，整形史，颌骨发育异常。本实验选取第 2 代中国数字化人体男性第 23 号为志愿者，年龄 23 岁，体重 65 KG，体重指数(BMI)为 22.76，身高 169 cm，签署知情同意书。

2.2. 影像设备及图像处理软件

- ① 日本 TOSHIBA 公司的 Aquilion-one 320 排螺旋 CT 机(层厚 0.5 mm，间距 0.5 mm，自头顶到第 7 颈椎断层影像 653 张)；
- ② 美国 GE 公司的 Excite-II 超导型 1.5T MRI 机；(层厚为 1 mm，层间隔 0 mm，双侧头颅断层影像 500 张)；
- ③ 美国 GE 公司的 HDx 超导型 1.5T MRI 机(层厚 1 mm，层间隔 0 mm，双侧 TMJ 断层影像 60 张)；
- ④ 比利时 Materialise 公司的 Mimics10.0 图像处理软件；
- ⑤ 美国 Rain-Drop 公司的 Geomagic9.0 逆向工程软件。

2.3. 建模方法

将志愿者全头颅 CT 及 MRI 扫描数据以 DICOM 格式导入 Mimics 中，调整合适的阈值获得不同蒙面，以 STL 格式导入 Geomagic 软件中，通过三角形面片的优化和删减，生成独立可操作的三维立体模型，最后生成 IGS 格式，为后期导入 ANSYS 中分析做准备。

2.3.1. 牙髓建模

用 CT 扫描数据以 DICOM 格式导入 Mimics，手动充填每一层面获得牙髓区蒙面，形成牙髓三维重建模型，导入到 Geomagic 软件中，选择简化多边形，再细化多边形，通过编辑多边形工具中的翻转边、分裂边及收缩边，删除质量差的三角片，去除特征和填充工具使得每个三角片的角度匀称及边长合适见(图 1)。

2.3.2. 牙骨质建模

牙齿三维模型建模方法如上述，完整的牙齿模型按照高出牙槽骨 2 mm 以及牙釉质与牙骨质之间的夹角即釉牙本质界这个标准将牙齿分成上部的牙釉质外层和下部的牙骨质外层。获得牙骨质外层后，将模型缩放 0.95 约 0.25 mm 宽，形成牙骨质内层即牙本质下部外层见(图 1)。

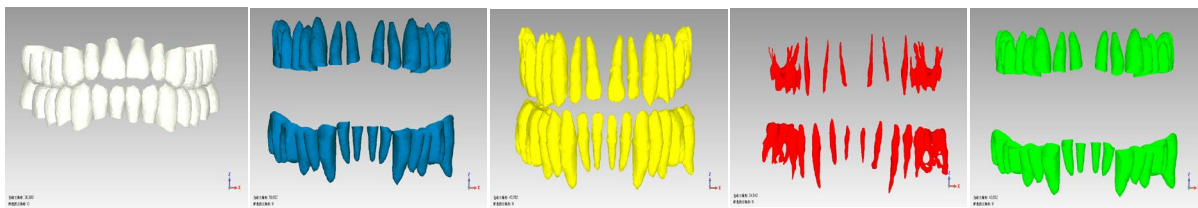


Figure 1. 3D model of enamel, cementum, dentin, dental pulp, periodontal ligament

图 1. 本实验建立牙釉质、牙骨质、牙本质、牙髓、牙周膜三维模型

2.3.3. 牙本质建模

手动获得牙本质区蒙面后，形成牙本质三维模型，将获得的模型剪裁后与牙骨质内层联合，即获得完整的牙本质外层模型，牙髓外层即牙本质内层，优化过程如上述。

2.3.4. 牙釉质建模

牙齿三维模型建模方法如上述，完整的牙齿模型按照高出牙槽骨 2 mm 以及牙釉质与牙骨质之间的夹角这个标准将牙齿分成上部的牙釉质外层和下部的牙骨质外层，牙釉质内层即牙本质外层，最后优化模型见(图 1)。

2.3.5. 牙周膜建模

将获得的牙骨质外层模型剪裁 2 mm 后，在前牙，前磨牙单根牙区和后牙区及多根牙区将模型向外偏移 0.25 mm [8]，如此便获得牙周膜外层模型，牙周膜内层模型即牙骨质外层剪裁 2 mm 后模型见(图 1)。

2.3.6. 下颌骨双皮质层建模

在 mimics 中测量厚度：颊侧内皮质前牙区，前磨牙区，后牙区分别约为 0.5 mm，0.75 mm，1.0 mm；舌侧内皮质前牙区、前磨牙区、后牙区分别约为 1 mm，1.5 mm，2.5 mm，牙槽嵴顶端的内皮质厚度约为 1 mm，下颌骨体颊侧，舌侧分别约为 1.5 mm，2 mm，而下颌角处颊侧和舌侧分别约为 2 mm，1.5 mm，髁突处骨皮质厚度约为 1.5 mm，喙突处骨皮质约为 1 mm，符合刘盼盼等[9]，关则任等[10]的测量规律。因此，将下颌骨三维模型按部位分割，按照上述标准进行偏移，再拼接优化，达到各部位可控性建模见(图 2)。

2.3.7. 上颌骨双皮质层建模

测量得出颊侧骨皮质厚度约为 1 mm，舌侧骨皮质厚度约为 2 mm，牙槽嵴顶取 1.5 mm，符合张晓燕等[11]的测量规律，以此数据完成拼接优化见(图 2)。

2.3.8. 包含颞下颌关节咬合系统及颌面骨建模

将 MRI 影像资料以 DICOM 格式导入 Mimics 软件中，通过设置灰度阈值及 Geomagic 的优化将颞下颌关节盘、颞肌、咬肌、翼内肌及翼外肌三维重建出来，再利用已知的关节面和关节盘边缘将关节软骨、关节囊建立出来[5]。将建好的全牙列精细模型与颌面咬合系统联合，实现无缝连接见(图 2)。

3. 结果

本实验建立了一个包含上颌骨双皮质层、下颌骨双皮质层，全牙列牙髓，牙本质，牙骨质，牙釉质，牙周膜，以及颞下颌关节骨骼肌肉系统和颅颌面的三维解剖学模型，用 Geomagic Studio9.0 以 IGS 格式导出。各个部件之间均实现无缝连接，并均可独立拆开，进行单独观察与测量分析。通过自带测量尺在所建模型上测的冠长、根长、冠宽、颈宽、冠厚、颈厚，结果见(表 1)。

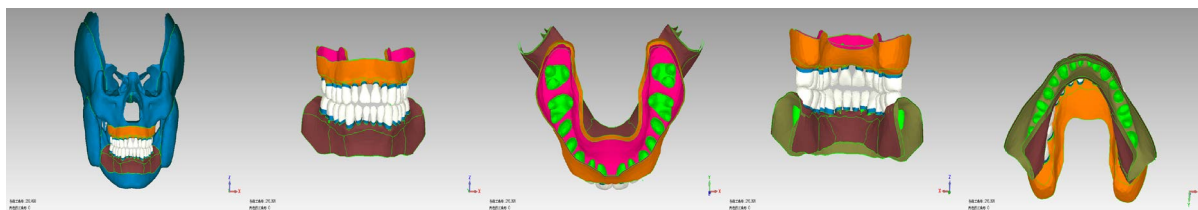


Figure 2. The structure of full teeth, upper and lower alveolar bone and craniofacial bone
图 2. 完整颌面解剖结构，上、下牙槽骨及全牙列精细结构

Table 1. Measurement of teeth
表 1. 牙体测量表

牙位	冠长(mm)	冠宽(mm)	冠厚(mm)	根长(mm)	颈宽(mm)	颈厚(mm)
上 1	10.55	8.265	6.35	11.85	5	5.815
上 2	9.127	5.8285	5.55	12.824	4.7865	5.1165
上 3	10.0425	8.3075	8.4445	12.971	6.7015	8.061
上 4	8.7485	6.946	9.095	11.5705	5.7475	7.974
上 5	8.622	6.7945	8.8105	12.251	5.1175	7.802
上 6	7.372	10.429	11.343	11.416	8.479	11.0055
上 7	7.611	10.162	11.266	11.9495	8.534	10.981
下 1	9.2835	5.3615	5.7295	9.9885	4.1275	5.239
下 2	9.27	5.6065	6.1005	10.922	4.27	5.8715
下 3	11.3045	7.525	8.555	14.5955	6.6425	8.07
下 4	8.5985	6.8225	7.6625	11.9205	5.27	6.763
下 5	8.018	6.9015	8.337	12.3465	5.4765	6.832
下 6	7.7835	10.98	10.7065	11.6885	9.8365	8.416
下 7	7.6195	11.094	10.5825	13.4185	9.5145	9.705

4. 讨论

4.1. 建模特点

三维有限元的建模方法大致有 5 种，即切片法，三维测量法，CT 或 MRI 图像处理法，DICOM 数据建模法和数字化虚拟人建模法[5]。DICOM 数据建模法是目前生物力学研究最常见的建模方法。本实验在前人建模的基础上，又建立了全牙列精细模型，为后期在 ansys 中定义模型的各项材料已知的弹性模量，进行三维有限元分析做了充足准备，大大增加了模型的适用性，在口腔各领域中均能发挥一定的作用。

4.2. 建模中的问题

牙体组织建模采用以釉牙骨质界为基准将牙釉质、牙本质、牙骨质分开建模，符合解剖学概念，有利于模型的独立建模，但对釉牙骨质界的定位上需要结合牙体 CT 解剖及牙釉质与牙骨质之间微小的台阶来确定，所以难度较大。另外，利用薄层 CT 建模精确度不如锥形束 ct，这也是本实验的不足。牙周膜建模是采用虚构式建模，以釉牙骨质界以下 2 mm 为基准建模，符合解剖学中生理学宽度概念，并埋入颌骨中，但是美中不足是由于该基准是手动优化确定，存在细微误差，误差在(2.0 ± 0.4 mm)之间。上下颌骨建模中，本实验采取分块测量分块建模，最后再整合模型的思路建模，所建模型更符合解剖学的流线形，但是模型与牙体连接的过程中可能会出现部分重叠现象，需要局部优化。颞下颌关节系统和咀嚼肌系统建模中采用前人建模方法，采用结合 MRI 和 CT 的校准和匹配建模，但存在一定的校准误差。

4.3. 建模的应用展望

1) **全牙列建模的应用**：更加准确分析各种不同咬合状态下的应力分析[12]，以及正畸内收时的各种生物力学[5]；2) **牙周膜建模的应用**：可以更好得分析咀嚼作用下各牙齿牙周生物力学状态，及各种牙在不同牙周病阶段时的牙周膜的生物力学[13]；3) **牙体组织建模的应用**：有利于进行牙体组织龋坏后的应

力分析, 以及不同修复体之间的差异性分析, 牙体牙髓在不同咬合状态下的应力变化[12] [14]; 4) **颞下颌关节及咀嚼肌的建模**: 可以更好得进行颞下颌关节应力分析[5], 牙齿和颞下颌关节之间联系的分析, 以及咀嚼肌在不同状态下的牙齿与颞下颌关节的应力变化[15]; 5) **颌骨与牙齿之间的接触**: 可以更好得分析牙外伤及各种受力方向上对颌骨的影响, 为颌骨与牙齿之间的生物力学分析架起桥梁[16]。

综上所述, 基于 CT、MRI 影像和解剖学, 利用医学影像处理软件 Mimics、Geomagic Studio 可以精确、可行地构建包括全牙列、颞下颌关节、咀嚼肌、颌骨的精细三维解剖学模型, 更真实和全面得还原了咀嚼系统的生物力学环境, 大大提高该模型在口腔各领域中的适用性, 为临床的测量和研究提供了更好的指导意义。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(81271663), 浙江省科技计划面上项目(2010C33123), 温州医科大学科研发展专项(QTJ06012), 温州市科技计划项目(2012S0155)。

参考文献 (References)

- [1] 皮昕. 口腔解剖生理学[M]. 第6版. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 285-286.
- [2] Thresher, R.W. (1973) The Stress Analysis of Human Teeth. *Journal of Biomechanics*, **6**, 443-449. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9290\(73\)90003-1](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9290(73)90003-1)
- [3] 艾林, 丁伟. 有限元法与口腔生物力学. 临床口腔医学杂志, 2005, 21(5): 318-319.
- [4] 王疆. 牙体组织精细三维有限元模型建立及应用的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 第四军医大学口腔医院, 2006.
- [5] 刘梦超, 吴信雷, 林崇翔, 等. 颞下颌关节骨骼肌肉系统三维有限元模型的构建[J]. 医用生物力学, 2015, 30(2): 60-67.
- [6] 沈晓. Tip-Edge Plus 矫治器上颌尖牙移动特征及对前牙转矩表达影响的研究[D]: [博士学位论文]. 吉林: 吉林大学口腔医学院, 2012.
- [7] 王慧媛. 固定义齿修复中牙周病基牙受力的有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 第四军医大学口腔医院, 2006.
- [8] 朱亚玲, 李闻颖, 张翼, 等. 上颌前牙舌侧差动内收力系三维有限元模型的建立[J]. 第三军医大学学报, 2014, 36(5): 466-469.
- [9] 刘盼盼, 谢志伟, 李国菊, 等. 汉族均角成年人群下颌体形态的测量分析[J]. 山东大学学报, 2013, 51(12): 95-99.
- [10] 关则任, 李淑婷, 常少海. 安氏 II 类 1 分类患者后牙区颊侧皮质骨厚度分析[J]. 广东牙病防治, 2014, 22(9): 476-480.
- [11] 张晓燕, 周聪, 姜玲, 等. 应用显微 CT 测量前牙区骨皮质厚度[J]. 中国医药科学, 2012, 2(9): 20-22.
- [12] 占柳, 谢淑娟, 潘卫红. 三维有限元法分析修复体应力变化的应用及前景[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17(29): 5403-5408.
- [13] 樊瑜波, 张晓峰, 唐高妍. 生理载荷作用下上颌中切牙牙周膜应力分布的三维有限元研究[J]. 生物医学工程学杂志, 1999(1): 21-24.
- [14] 陈学鹏, 张加理, 顾锡荣. 三维有限元法在牙体牙髓病中的应用进展[J]. 国外医学口腔医学分册, 2004, 31(3): 235-237.
- [15] 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.
- [16] 周健, 吴炜, 孙庚林, 等. 颞上颌骨复合体骨折坚强内固定三维有限元模型的建立及其初步分析[J]. 天津医科大学学报, 2007, 13(1): 1-3.