

种植体支持的上颌无牙颌固定义齿三维有限元建模

董海东^{1,2}, 赵毅¹, 汤春波^{1*}, 周储伟³, 孙玉林³

(¹南京医科大学口腔疾病研究江苏省重点实验室, 南京医科大学附属口腔医院种植修复科, 江苏 南京 210029; ²南京医科大学附属无锡市精神卫生中心, 江苏 无锡 214001; ³南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

[摘要] 目的: 建立种植体支持的上颌无牙颌固定义齿三维有限元模型, 以便分析种植固定桥及上颌骨的应力分布, 为临床应用提供参考。方法: 选择 1 例上颌牙列缺失, 牙槽骨中度吸收的志愿者, 对其头颅部进行锥形束 CT(cone-beam-computed tomography, CBCT)扫描, 并利用计算机软件进行数据转换, 完成上颌骨三维实体模型的重建; 利用光学测量与平面影像测量相结合的方法, 完成 Bego 种植体(L=13 mm, D=4.5 mm)的精确建模; 并用激光扫描的方法完成种植固定桥的建模, 为后面的有限元分析提供准确的数据。结果: 成功地建立了种植体支持的上颌无牙颌固定义齿三维有限元模型, 并在保持原模型力学相似性的基础上对其进行了简化, 提高了分析效率和精确性。结论: 基于 CBCT 扫描、三维激光扫描、逆向工程技术和快速成型技术建立种植体支持的上颌无牙颌固定义齿几何模型, 利用有限元软件进行网格划分生成有限元模型的方法是可行的, 并保证了很好的几何相似性。

[关键词] 三维有限元; 上颌无牙颌; 牙种植体; 骨界面; 应力分布

[中图分类号] R783.6

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2014)11-1604-05

doi: 10.7655/NYDXBNS20141135

Establishment of three-dimensional finite element models of a dental implant fixed dentulous maxillary

Dong Haidong^{1,2}, Zhao Yi¹, Tang Chunbo^{1*}, Zhou Chuwei³, Sun Yulin³

(¹Jiangsu Key Laboratory of Oral Diseases, Department of Implantology, Affiliated Hospital of Stomatology, NJMU, Nanjing 210029; ²Department of Stomatology, Wuxi Metal Health Center, Wuxi 214001; ³State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[Abstract] **Objective:** Through the establishment of a 3D finite element model of a dental implant fixed edentulous maxillary and analysis of the stress distribution of implant in different position, we propose to provide a reference for clinical applications. **Methods:** In this research, we selected a volunteer of edentulous maxillary and moderate alveolar bone absorption, and then scanned his head with cone-beam computed tomography (CBCT). This research used a series of computer software for data conversion to reconstruct three-dimensional solid model of the maxillary. The three-dimensional solid model of Bego implant was accurately obtained by an integrated method, which combined the optical measurement of implant profile data by 3D optical grating projection with the plane-image measurement of characteristic details. A 3D finite element model of a dental implant fixed bridge was built successfully by laser scanning. **Results:** We successfully established the three-dimensional finite element model, and simplified it with maintaining the similar mechanics of the original model to improve the efficiency and accuracy of the analysis. **Conclusion:** Three-dimensional finite element models of a dental implant fixed edentulous maxillary established by the method of combining CBCT, 3D laser scanning, rapid prototyping, and to generate finite element model by grid partition of finite element software are feasible and with a good geometric similarity.

[基金项目] 国家自然科学基金(81470778); 江苏省卫生厅科技项目(H201034); “江苏省六大人才”高峰项目(2010-WS081); 江苏省科技支撑项目(BE2011778); 江苏高校优势学科建设工程资助(2014-37)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: cbtang@njmu.edu.cn

[Key words] three-dimensional finite element; edentulous maxillary; dental implant; bone-to-implant interface; stress distribution

[Acta Univ Med Nanjing, 2014, 34(10): 1604-1608]

如今各种原因导致的牙列缺失是常见的口腔临床症状之一。传统全口义齿修复很难满足患者需求,越来越多的患者选择种植体支持的固定义齿。研究人员应用种植体对牙列缺失患者进行了修复,并取得了较好效果^[1-3],但是经过研究者长期的临床实践研究发现,种植体 5~16 年的失败率是 6%~35% 不等,种植体失败还是不可避免的^[4-7],导致种植体失败的众多因素中生物力学因素占有主要作用^[8-9]。目前种植体在口腔中的受力分布是评价患者种植手术方案设计和选择是否合理的一项重要方面,其中种植手术是否成功的关键因素在于种植体的生物力学效应^[10-11]。目前对种植体的生物力学分析就是进行有限元分析,而有限元分析最重要的前提之一是建立有限元模型。

本研究在上述研究背景下,基于锥形束 CT (cone-beam-computed tomography, CBCT) 扫描、三维激光扫描、逆向工程技术和快速成型技术建立了与含种植体固定桥无牙颌上颌骨相似的几何实体模型,并利用商用有限元软件 ABAQUS 建立了三维有限元模型,为种植体支持的种植固定桥和无牙颌上颌骨的应力分析提供了基础。

1 材料与方法

1.1 材料

志愿者 1 例,女,年龄 55 岁,上颌为无牙颌,下颌有天然牙。锥形束 CT 机(New Tom VGi,意大利),微型计算机 (Win7 PC, 2.5 G CPU, 4.0 G RAM, Lenovo 公司, 中国), 三维重建程序(Mimics10.01, Materialise 公司, 比利时), CAD 计算机辅助设计软件 (Geomagic Studio12, Raindrop 公司, 美国), Abaqus 有限元分析软件(Abaqus6.9, 达索 SIMULIA 公司, 法国)。Bego 种植系统种植体 1 枚(Bego 种植体 Ti Pure, 57731, 德国)。

应用锥形束 CT 机对该女性志愿者进行扫描,测试对象取坐位,上下颌咬紧于咬合板,头部固定,进行颌颌面的扫描,检查垂直校准、法兰克福校准是否与患者头部的正确位置对齐,对鼻根至下颌骨下缘之间这个范围进行扫描。应用以下参数,扫描层距、层厚 0.2 mm,电压 110 kV,得到上颌骨二维扫描断面图像 482 幅,输出 DICOM 格式,传到计算机中。

1.2 方法

1.2.1 无牙颌上颌骨三维有限元模型的建立

将 CBCT 扫描所得到的二维扫描断面图像中不同的灰度值代表不同的结构区域,由于直接利用 CT 数据生成的模型噪点比较多^[12],所以先利用通用图像处理软件 Photoshop 提取每一断层的下颌骨皮质骨和松质骨的轮廓线,再导入三维医学成像软件 Mimics,利用区域增长功能,对选定的图像进行图像分割,实现不同结构的图像重建,导出皮质骨和松质骨的点云文件,利用 Geomagic Studio 导入点云文件,处理生成两个部分的 NURBS 曲面片模型,最后用 CATIA (CATIA V5R19, 达索公司, 法国)快速成型功能生成上颌骨的实体模型。

1.2.2 种植体三维有限元模型的建立

本研究取 Bego 种植体:4.5 mm × 13.0 mm; 粘结基台高度 9 mm; 基台底部螺丝直径 1.8 mm; Bego 内六角圆锥混合连接的实体模型。利用北京博维恒信公司 3D CaMega 高精密度五轴系统,由相机捕获的变形光栅条纹的数字图像经过解码算法处理,计算单个视图物体上的三维数据点,由多视角测量拼合后形成一个完整的物体点云模型,对测量完成后的点云数据进行预处理,去除噪点、提取有效特征,再通过平面测量设备,获得由于光学测量的精度、光线遮挡等因素无法有效获取的种植体螺纹、倒角等小特征的几何数据信息,本实验采用美国 OGP 三维影像测量仪作为几何尺寸的补充测量。该设备具有超强功能的视频测量系统。并对表面特征进行重建,最后获取特征的描述参数,通过逆向获取的模型特征参数,再利用正向建模工具进行基于实体的特征建模,构造出种植基台实体模型。

1.2.3 建立上颌种植固定义齿的三维有限元模型

用 3Shape Scanner D700 激光扫描仪扫描患者的种植固定义齿,为了和种植体基台很好地结合,本研究选择了手动蜡型扫描的方法扫描修复体的内外冠形状,直接根据患者的种植固定义齿扫描的 STL 数据,输入计算机软件 Geomagic Studio,分析处理得到 IGS 格式的曲面模型,将种植体填平得到一个完整的上颌牙列固定义齿。最后利用三维建模软件 CATIA 转换成实体模型导入有限元分析软件 ABAQUS 中。

2 结果

2.1 上颌骨有限元模型的建立

建立了上颌骨的有限元模型,上颌窦底的不规则形态、鼻底的形态清晰可见,牙槽突的凹陷、凸起、

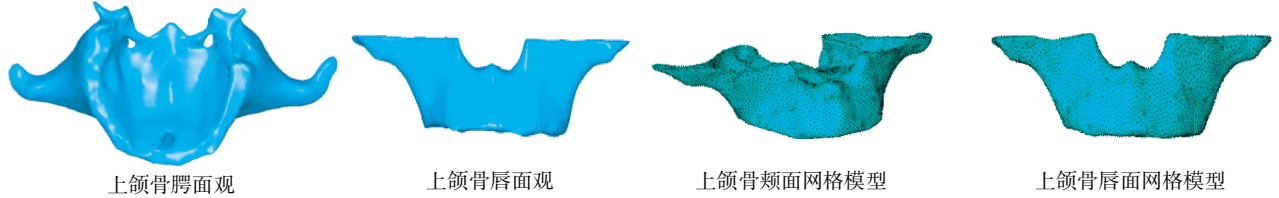


图1 上颌骨三维空间外形

Figure 1 Three dimensional finite element models of maxillary bone

的螺纹还是内部的中央螺丝都达到最大限度的几何相似性。单元类型为 C3D4(四节点线性四面体单元),节点数 33 789,单元数 159 304(图 2)。

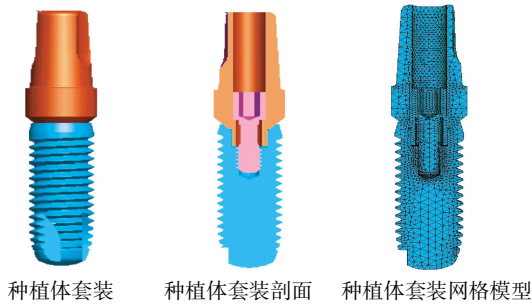


图2 种植体的三维有限元模型

Figure 2 Three dimensional finite element models of Bego implant

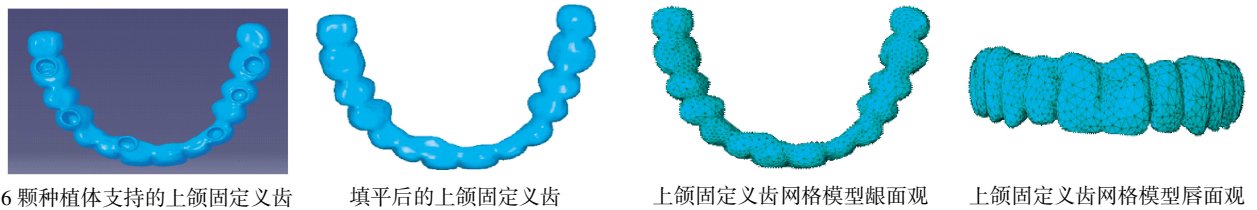


图3 上颌种植固定义齿的三维有限元模型

Figure 3 Three dimensional finite element models of a dental implant fixed maxiliary



含8颗种植体支持的种植固定义齿有限元模型

图4 最终有限元模型

Figure 4 The final three-dimensional finite element model

左右不对称显露无疑,解剖标志如切牙孔、腭大孔、颧突等一目了然。单元类型为 C3D4(四节点线性四面体单元),节点数 25 593,单元数 115 253(图 1)。

2.2 种植体三维有限元模型的建立

建立了种植体的三维有限元模型,无论从外面

2.3 种植体支持的上颌固定义齿的有限元模型

建立了种植体支持的上颌固定义齿的有限元模型,并对实体模型进行了修改。单元类型为 C3D4(四节点线性四面体单元),节点数 6 518,单元数 28 078 (图 3)。

2.4 最终的有限元模型建立

最终建立的有限元模型一共有 3 个部分。第 1 部分是上颌骨的模型;第 2 部分是种植体支持的固定义齿上部结构;第 3 部分是覆盖所有后牙位点的 8 颗种植体的有限元模型。该模型可以随意拆卸,这样便于观察每一部分的应力情况,包括每部分内部的应力情况;种植体的数目可以根据实验需要增减、组合,便于以后的有限元分析(图 4)。

3 讨论

3.1 关于上颌骨有限元模型的实物相似性

有限元模型的建立是有限元分析的基础,是有限元分析的关键步骤。由于受到建模方法的制约,目前建立的上颌骨及颅骨三维有限元模型难以完整重现上颌骨复杂的形态,而有限元模型的几何精度对计算结果有较大影响^[13-14]。对于单一上颌骨的有限元模型来说,本研究建立的上颌骨上颌窦底部

分是完全按照患者的上颌窦底形状建立的。上颌骨牙种植手术最重要的要求是防止打穿上颌窦底,在本研究中是将上颌窦视为实体模型的边界曲面,可以很好地发现种植体是否穿出上颌窦。还有本研究并没有通过颌骨左右对称的原理来简化建模,因为患者的上颌窦、牙槽骨左右并不是完全对称的,上颌窦有时还存在气腔化^[15]。

本研究建立的上颌骨模型也是目前常用的 CT 法直接建模,采用的是 CBCT 扫描的 DICOM 数据直接建模。和传统 CT 相比,CBCT 不仅大大减少了曝光辐射剂量,其数据更可以在初次重建获得的轴位图像上进行多向、多层次重建或三维重建,在轴向位有更清晰的图像^[16]。Pinsky 等^[17]认为 CBCT 在牙槽骨缺损的高度和宽度成像方面有更大的优势。这正是本研究所需要的。为了得到精确的三维模型,对扫描的图像有一定要求,图像的分辨率最好达到 512×512 ,扫描间距 $< 1 \text{ mm}$ 。本研究图像的重建厚度为 0.2 mm ,完全符合其要求。

本研究利用 Mimics 直接读取 DICOM 数据只能建立三维孤立网格模型,非三维实体模型,不便于后期修改操作。所以本研究首先利用 Mimics 导出三维点云模型,然后经过其他软件处理生成实体模型,最终导入有限元软件进行网格划分,最终建立三维有限元模型。DICOM 医学数字图像通讯,是医学信息领域中的一种通用的图像及数据通讯标准,国际上已广泛应用于各医学成像设备及信息系统中^[18]。这样做可以节省很多建模中央环节,建模的几何精度高,实体模型的特征信息丢失少。

本研究使用的曲面是 NURBS (non-uniform rational B-splines) 曲面,该曲面的应用使得曲面构建变得简单方便^[12],避免了人为选择标志点,构建的模型几何相似性较高,而且保证了曲面的平滑性和连续性,特别适合构建复杂的曲面造型,颌骨造型就是复杂曲面之一。由于上颌骨形态不规则,表面就是复杂曲面,所以本研究也利用了该软件的这一优势。

3.2 种植体建模的几何相似性

种植体建模主要采用基于逆向工程 (reverse engineering, RE) 的建模,逆向工程也称反求工程、反向工程,它广泛应用于各个领域。在医学方面主要有:人体生物力学研究、外科手术规划和设计制作假体^[19]。本试验利用光栅投影三维测量精度高的特点(测量误差 $< 0.03 \text{ mm}$)快速实现种植体的三维建模,而对螺纹、牙型、牙距等细微特征,则采用平面

投影测量,综合两种建模方法的优点,采用基于特征拟合重建的方式,有效地完成了种植系统建模,该方法具有一定适应性,既可以保证建模精度,也具有一定效率。

3.3 种植固定义齿建模的几何相似性

本研究将种植固定义齿扫描所得的 stl 数据直接导入 Geomagic Studio,在 Geomagic Studio 中打开该文件,除掉噪点和边缘部分,合理运用 Geomagic Studio 中各种逆向由点云构建曲面的方法重建模型。总体来说为以下两方式:点云—曲线—曲面、点云—曲面。由于人体颌骨的表面曲率变化复杂,本研究中是采用两种方式相结合的方法来重建模型,主要是直接利用其通过点云构造曲面的工具,快速准确地逐一构造出主要轮廓面。这样建模的方法可以很好模拟种植固定义齿的外形。

本研究选择患者口腔中的种植固定义齿实体直接扫描,与以往研究中使用的石膏模型建模相比具有更多优点:可以省去取模、翻模等中间步骤,使得建模变得快速有效,几何相似性高;还可为种植体植入位点提供准确的位置信息,为将来的有限元分析提供明确定位;另外,这样建模可以较为准确地模拟咬合平面,为有限元分析提供精确的加载平面,因为种植体咬合面的形态设计会影响咬合力在种植体和骨界面的传递^[20]。当然,和那些只是通过画几何图、蜡型建模相比,直接实体建模更精确。

本研究中建立的三维几何模型外形较为精确,可以根据研究需要,通过计算机辅助设计、材料属性转换及局部网格加密技术对模型进行修改,而后可以进行相关的力学分析研究。当然,种植体的应力影响因素很多,比如种植体的数目、直径、长度、植入的角度以及力的加载方式等等,在今后的研究中会进一步讨论。

[参考文献]

- [1] Emami E, Heydecke G, Rompre PH, et al. Impact of implant support for mandibular dentures on satisfaction, oral and general health-related quality of life: a meta-analysis of randomized-controlled trials [J]. Clin Oral Implants Res, 2009, 20(6): 533-544
- [2] Sadig W. A comparative *in vitro* study on the retention and stability of implant-supported overdentures [J]. Quintessence Int, 2009, 40(4): 313-319
- [3] 耿威, 宿玉成, 张雪净, 等. 12 例重度慢性牙周炎患者全颌种植义齿修复的临床观察 [J]. 中华口腔医学杂志, 2007, 42(4): 231-234

- [4] Jaffin RA, Berman CL. The excessive loss of Branemark fixtures in type IV bone: a 5-year analysis[J]. *J Periodontol*, 1991, 62(1): 2-4
- [5] ten Bruggenkate CM, Asikainen P, Foitzik C, et al. Short (6-mm) nonsubmerged dental implants: results of a multicenter clinical trial of 1 to 7 years[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 1998, 13(6): 791-798
- [6] Ferrigno N, Laureti M, Fanali S, et al. A long-term follow-up study of non-submerged ITI implants in the treatment of totally edentulous jaws. Part I: ten-year life table analysis of a prospective multicenter study with 1286 implants[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2002, 13(3): 260-273
- [7] Simonis P, Dufour T, Tenenbaum H. Long-term implant survival and success: a 10-16-year follow-up of non-submerged dental implants[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2010, 21(7): 772-777
- [8] Bedrossian E, Sullivan RM, Fortin Y, et al. Fixed prosthetic implant restoration of the edentulous maxilla: a systematic pretreatment evaluation method [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2008, 66(1): 112-122
- [9] Rosén A, Gynther G. Implant treatment without bone grafting in edentulous severely resorbed maxillas: a long-term follow-up study[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2007, 65(5): 1010-1016
- [10] Jins J, Rangarajan V, Savadi RC, et al. A finite element analysis of stress distribution in the bone, around the implant supporting a mandibular overdenture with Ball/O ring and magnetic attachment[J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2012, 12(1): 37-44
- [11] Danza M, Zollino I, Paracchini L, et al. 3D finite element analysis to detect stress distribution: spiral family implants[J]. *J Maxillofac Oral Surg*, 2009, 8(4): 334-339
- [12] 陆晓丰, 吴凤鸣, 董宁, 等. 基于逆向工程的上颌第一恒磨牙有限元模型的建立[J]. *口腔医学*, 2011, 31(11): 653-656
- [13] Gross MD, Arbel G, Hershkovitz I. Three-dimensional finite element analysis of facial skeleton on simulated occlusal loading[J]. *J Oral Rehabil*, 2001, 28(7): 684-694
- [14] 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
- [15] 夏雯, 陈江, 黄文秀, 等. 无牙颌的种植义齿支持式固定修复——附1例病例报道[J]. *口腔颌面外科杂志*, 2011, 21(2): 134-137
- [16] Scarfe WC, Farman AG, Sukovic P. Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice[J]. *J Can Dent Assoc*, 2006, 72(1): 75-80
- [17] Pinsky HM, Dyda S, Pinsky RW, et al. Accuracy of three-dimensional measurements using CBCT [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2006, 35(6): 410-416
- [18] Escott EJ, Rubinstein D. Free DICOM image viewing and processing software for your desktop computer: what's available and what it can do for you [J]. *Radiographics*, 2003, 23(5): 1341-1357
- [19] Barbero BR. The recovery of design intent in reverse engineering problems[J]. *Comput Indust Eng*, 2009, 56(4): 1265-1275
- [20] Juodzbals G, Raustia AM, Kubilius R, et al. A 5-years follow-up study on one stage implants inserted concomitantly with localised alveolar ridge augmentation[J]. *J Oral Rehabil*, 2007, 34(10): 781-789

[收稿日期] 2014-05-13