

文章编号: 0258-7025(2009)10-2538-05

基于 CT 扫描和激光烧结技术的上颌骨及牙列 三维仿真与修复

颜功兴 刘占芳 冯晓伟

(重庆大学资源及环境科学学院工程力学系, 重庆 400030)

摘要 以颅骨标本作为建模素材,通过螺旋 CT 扫描技术及三维影像技术完成初步重建,建立上颌骨及牙列的三维有限元模型(FEM),在此基础上运用快速原型技术得到修复体并进行颌面修复。运用此方法可以获得形态细致逼真的上颌骨及牙列三维重建生物力学模型和修复体,修复后形态与功能得以很好重建。可以为不同患者设计不同的方案,生成个性化的缺损模型和修复体模型。外形美观,成本费用低,术后并发症少,为临床探索上颌骨及牙列的修复设计了一套完整思路。

关键词 激光烧结技术;CT 扫描;上颌骨;有限元分析

中图分类号 R783.5;TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093610.2538

Three Dimensional Simulation and Repair of Skull Maxilla and Dentition Based on CT Scanning and Laser Sintering Technologies

Yan Gongxing Liu Zhanfang Feng Xiaowei

(Department of Engineering Mechanics, Collage of Resource and Environmental Science,
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract Based on distinct patients and different design project, individual harmed model and restoration model can be built. According to the 3D simulation of maxilla, skull and dentition, standard mathematical model and entity model for maxilla repair can be provided. On the basis of scanned skull image, using CT image reconstruction technique and 3D finite element model (FEM), and the maxillofacial repair by restoration with rapid prototyping production technique, a good 3D FEM of normal maxillary and dentition and restoration are constructed. Then, configuration and function of maxillofacial are rebuilt after repair. 3D FEM of normal maxillary, dentition and restoration by CT image reconstruction, 3D FEM and rapid prototyping production technique can be achieved with fine appearance, low cost and less post-operative complications. This method offer a complete idea for maxilla and dentition repair in clinic research.

Key words laser sintering technique; CT scanning; maxilla; finite element analysis

1 引言

因创伤及手术等因素造成颅骨缺损是外科常见病之一,颌骨缺损常有颌骨移位、咬合错乱、牙列缺失等,影响患者的口颌系统功能,且患者对颅骨修补术后头颅形状的满意程度直接影响其今后社交生活的心态和生活质量。目前,临床上虽可通过多种方法恢复面部形态,但采用现有的修复方法均不能达

到理想的个体颌骨形态^[1],只能大致恢复面部形貌,特别是不能为牙列缺失修复创造必要的条件,直接影响口腔功能的重建。

激光快速原型(RP)技术,是国外 20 世纪 80 年代后期发展起来的一门新兴技术。它是将计算机内的三维实体模型进行分层切片得到各层截面的轮廓,计算机又将此信息控制激光器(或喷嘴)有选择

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(10572160),教育部高等学校骨干教师资助计划和重庆市科委资助课题。

作者简介: 颜功兴(1973—),男,博士,高级工程师,主要从事生物力学和光测力学等方面的研究。

E-mail: yaaangx@126.com

性地切割一层又一层的片状材料形成一系列具有一个微小厚度的片状实体,再采用粘接、聚合、熔结、焊接或化学反应等手段使其逐层堆积成一体制造出所设计的三维模型或样件^[2]。

本研究通过螺旋 CT 扫描技术及三维影像技术完成初步重建,并在此基础上运用 Abaqus 软件建立了形态逼真的上颌骨及牙列三维有限元模型(FEM),再利用快速成型技术的快速性、准确性以及擅长制造复杂实体的特点,将其运用于上颌骨及牙列缺损的整复,采用个性化设计和个性化制造的理念和手段,在精确整复缺损、恢复外形的基础上进行修复,探索一种既能获得满意的面部外形,又能恢复功能的颌面缺损修复手段。

2 实验方法

2.1 建模素材

经防腐处理的头颅标本一例,其牙列完整,牙弓形态基本对称,颌关系正常。

2.2 头面部 CT 扫描

采用 Philip CT 扫描机对头颅标本进行连续螺旋扫描及三维影像重建。螺旋扫描参数如下:球管电流与电压 150 mA/120 kV。扫描范围自颅骨顶始,至下颌骨下缘止,层厚 1 mm,最终得到 224 张断层扫描图像并传入重建工作站,以 DICOM 格式存储。

2.3 三维影像重建

在电脑上通过 Mimics 软件读取数据,图 1,图 2 即为颅骨 CT 断层扫描图像。选择上颌骨及牙列所在的层面为建模范围,利用阈值设定和区域生长功能,选择合适的参数对上颌骨及其牙列分别进行三维重建,得到的模型如图 3,图 4 所示。将重建模型中的上颌骨和牙列分别以 STL 文件格式输出到逆向软件中,去除模型的噪点,曲面重构,利用点云数据运算出无缝隙的多边形,再以 IGES 格式输出。



图 1 颅骨螺旋 CT 扫描正面观

Fig. 1 Front view of skull images by CT scanning



图 2 颅骨螺旋 CT 扫描侧面观

Fig. 2 Side view of skull images by CT scanning

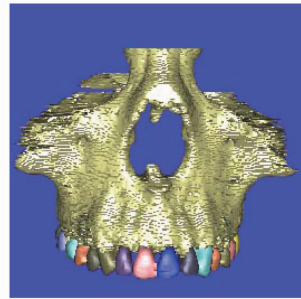


图 3 Mimics 中建立的上颌骨及牙列模型正面观

Fig. 3 Front view of maxilla and teech model in Mimics

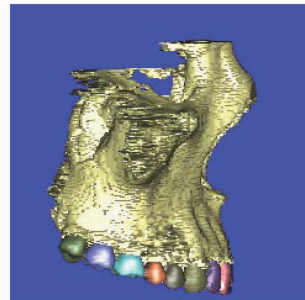


图 4 Mimics 中建立的上颌骨及牙列模型侧面观

Fig. 4 Side view of maxilla and teech model in Mimics

2.4 有限元模型

2.4.1 导入模型

在 Abaqus 软件中分别读取 IGES 格式的上颌骨及牙列模型数据,然后通过布尔运算把上颌骨和牙列组集到一起,定义牙齿和颌骨之间没有相对滑动。为了简化模型,去除模型中应力分布影响较弱

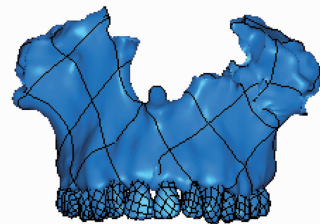


图 5 上颌骨及牙列螺旋 CT 三维重建影像正面观

Fig. 5 Front view of maxilla and teech 3D rebuilding model by CT scanning

的部分(如鼻梁骨),得到的模型如图 5,图 6 所示。

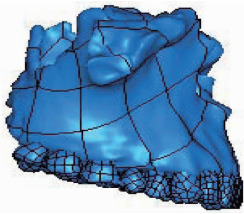


图 6 上颌骨及牙列螺旋 CT 三维重建影像侧面观
Fig. 6 Side view of maxilla and teech 3D rebuilding model by CT scanning

2.4.2 材料力学参数

将材料考虑为连续、均匀、各向同性的线弹性材料,材料变形为小变形,受力时模型各截面均不产生相对滑动,其材料参数见表 1^[3]。

表 1 有关材料力学参数

Table1 Mechanical parameters of related materials

Material type	Elastic modulus	
	E /GPa	Passion ratio μ
Cortical bone	13.7	0.3
Cancellous bone	1.37	0.3
Teeth	20.7	0.3

2.4.3 网格划分

由于模型关于正中矢状平面对称,为了减少计算工作量,网格划分都只对右侧上颌骨和牙列进行,如图 7,图 8 所示。采用四面体实体单元对模型划分网格,颌骨部分网格划得比较稀疏,牙齿等局部细微的地方对网格进行加密,以保证模型的精度。模型总节点数为 71734,单元总数为 362914。

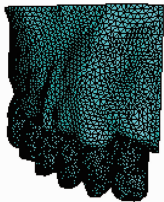


图 7 已划网格的右侧上颌骨及牙列模型正面观
Fig. 7 Front view of right side maxilla and teech mesh model

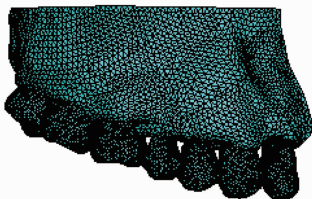


图 8 已划网格的右侧上颌骨及牙列模型侧面观
Fig. 8 Side view of right side maxilla and teech mesh model

2.4.4 边界条件

由圣维南原理可知,受力区域只在载荷附近的区域内,所以在实际计算中为减小计算量只取上颌骨的一部分,上颌骨顶部完全固定约束,如图 9 所示。

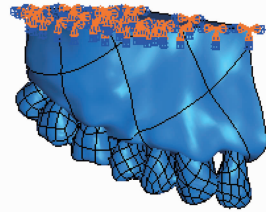


图 9 边界条件示意图

Fig. 9 Sketch of boundary conditions

2.5 假体的制作

对切除部分上颌骨及牙列的患者,按照手术设计在数字模型上切除病变区上颌骨及牙列,获得缺损部分的模型。调整点云数位置和角度,通过数据的镜像对称形成缺损区的资料,再进行修复体的曲面设计与修饰,再将 STL 格式文件数据传送到制作中心(重庆市假肢厂)进行修复体的实体化,以获得修复体模型,最后对修复体进行后处理(含修复体的洗、钝化和义齿固位装置的制备)。HLP-450 快速成形机(北方恒利科技发展有限公司制造)的加工系统参数:层厚 0.1 mm,加工速度 2000 mm/s,激光功率 13 W,加工温度 80 °C,耗时 6 h。

2.6 修复体的植入

全麻下制备受床以容纳修复体^[4]。支架内用疏松质髂骨充填,牙槽嵴面由薄层皮骨覆盖并用修复体固位。健侧需作颌间结扎以防止合错乱,检查健侧咬合关系无误后,用双皮质螺钉将伸板与下颌骨残端固定。术后常规应用抗生素预防感染。

3 结果与分析

有限元方法由于其独特的优势,已在口腔生物力学以及颌面损伤研究中得到了广泛的发展和应用^[5~7]。它与传统实验性应力分析相比,可提供模型任何部位的应力和位移,并可根据需要修改力学参数,在维持原模型几何形状不变的情况下,对各种应力的大小和分布进行对比分析。由于使用了先进的电子计算机,庞大的数据处理则变得较为容易。这种方法高效、精确、可信度高、成本低,已成为结构优化设计、材料非线性和几何非线性分析的一种实用、有效、方便的应力分析方法。本文探索出了一套数字化程度高、适用于活体的三维有限元方法。

有限元模型首先要求模型和原物的几何相似性

强,在 CT 扫描时,如果断层越密,其几何相似性越好,模型的几何形态越接近实物。人体头颌骨牙列形状复杂,具有空间三维曲面、形状小且多处为混合曲面以及曲面形状变化多样等特点。能否获取准确的数据决定了三维有限元模型的几何相似性。本文采用 CT 技术获取各层的解剖轮廓图,可以实现间隔较密的平行扫描,每层的解剖结构清晰可见,能较真实地代表原物。模型具有可编辑性,可进行任意分割、旋转,在三维立体空间可以从研究者需要的任何角度进行观察^[7,8]。同时模型引入了上颌骨及牙列的力学材料常数,使建立的模型与实体相比具有良好的生物力学相似性^[9]。

上颌及牙列缺损是口腔修复的常见疾病,其类型繁多,如果针对每一个病例进行个体化建模和生物力学分析,再制定修复设计的最佳方案,其成本高、效率低,在实际工作中不够现实。本文在建立上颌骨及牙列模型的基础上提出“模块化”的概念,使模型具有“开放性”及“可编辑性”,可以根据不同的患者,不同的设计方案,生成个性化缺损模型和修复体模型,节省了重复建模所需要的时间和精力,获得了与患者个体较为接近的模型^[10~12],在口腔修复和正畸教学、科研、临床上都有较大的实用价值。

选区激光烧结技术的成型过程与零件的复杂程度无关^[13],可以成型几乎任意几何形状的零件,头颅骨结构为人体最为复杂的骨性结构,其曲面多,中空结构多,选择激光烧结技术制作头颅骨模型是一种较为可行的方法。该技术应用在颌颌面修复方面,主要是因为颌面部器官多呈对称性,对于一侧器官缺损通过对侧数据来对缺损进行重建,能保证面部双对称性。对于跨过中线区的缺损,可以通过剩余下颌骨的外形曲线计算出颌骨整体的曲线,进一步恢复上颌骨的形态,还可以对模型进行快速、准确的测量,找出设计中的不足进行修改,特别是对上颌骨重建后修复体位置及方向的确定可以有一个直观概念^[14,15]。

患者在颌颌面外科手术前用 RP 模型来诊断和制订手术计划,统计结果显示在各个方面都有较大的提高^[2]:诊断的准确率由影像学诊断的 65.5% 提高到生物模型的 95.2%,测量的准确性从影像学的 44% 测量误差降到有生物模型的 8%,手术时间也大大减少。在骨肿瘤切除、各种畸形矫正中,快速成型利用人体对称的原理进行重建假体个体化制造,加之其生产周期短、可通过互联网实现远程制造的特点,显出了无法比拟的优势。

本研究采用上述方法进行上颌骨及牙列的功能重建,从初步临床效果看,在形态和功能重建两方面都具有很大的优势:首先是在手术中省去了修复体塑形的过程,大大节省了手术时间;其次是患者面部外形美观,咬合关系良好。重庆市口腔医院对 8 名上颌及牙列患者在术后随访(随访 39~68 个月,平均 48 个月),查 X 线片:头颅后前位、颅基位及全口曲面断层示修复体固定良好、无松脱,外形对称,植骨块致密坚硬,植体结合紧密、牢固无松动。

4 结 论

该模型形态细致逼真,模型形态与实体标本一致,可以被任意旋转并可以从不同角度观察,得到的上颌骨及牙列骨骼鲜明、直观、完整。模型可编辑性强,可进行任意分割、复制和存储。模型可用于口腔修复学中牙列缺损和修复的病例模型,同时也可分析口腔正畸学中微植体植入后上颌骨的生物力学响应。

根据上颌骨及牙列三维有限元模型,再利用快速成型技术的快速性、准确性以及擅长制造复杂实体的特点,将其运用于上颌骨及牙列缺损的整复,可以获得逼真的修复体。

本项研究可以为不同的患者设计不同的方案,生成个性化的缺损模型、修复体模型。为临床探索上颌骨及牙列的修复设计了一套完整思路,这里对模型进行了假设和简化,其中有些与实际情况不完全相符,如在提取上颌骨和牙列的过程中有手工操作等。因此,本项研究建立的上颌骨及牙列有限元模型和修复体再优化还有待进一步研究。同时,如果能应用生物活性材料制作修复体,并结合组织工程方法减少甚至不需自体取骨,将是今后研究的方向。

参 考 文 献

- 1 Tang Wei, Tian Weidong. Clinical study of surgical treatment for panfacial fractures [J]. *Chinese J. Trauma*, 2005, **21** (12): 881~883
汤 炜,田卫东.全面部骨折手术治疗的临床研究[J].中华创伤杂志,2005,**21**(12):881~883
- 2 Guo Jian, Zhu Fei. Method of manufacture to RP technology according to CT image in medicine [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(1): 70~71
郭 建,朱 飞.基于医用 CT 成像技术的快速原形制造方法[J].激光杂志,2008,**29**(1):70~71
- 3 Li Ling, Xue Miao. 3-D reconstruction and FEA modeling of jaws and dentition [J]. *Chinese J. Dental Materials and Devices*, 2003, **12**(3): 117~121
李 玲,薛 淼.上下颌骨及牙列三维有限元模型的建立[J].口腔材料器械杂志,2003,**12**(3):117~121
- 4 Gong Zhenyu, Liu Yanpu, Zhou Shuxia *et al.*. Reconstruction of man dibular bone defects by using the techniques of reverse

- engineering and rapid prototyping[J]. *Chin J. Stomat.*, 2004, **39**(1): 9~11
- 龚振宇,刘彦普,周树夏等. 基于反求工程和快速原型的下颌骨缺损的修复[J]. *中华口腔医学杂志*, 2004, **39**(1): 9~11
- 5 Yan Gongxing, Li Qi. Construction of three dimensional finite element model of human maxilla and dentition[J]. *Medical J. Chinese People's Health*, 2006, **18**(10): 768~769
- 颜功兴,李琦. 成人上颌骨及牙列三维有限元模型的建立[J]. *中国民康医学*, 2006, **18**(10): 768~769
- 6 Zhao Zhihe, Fang Bing. The construction of the three-dimensional finite element model of the human skull[J]. *West China J. Stomatology*, 1994, **12**(4): 298~300
- 赵志河,房兵. 颅面骨三维有限元模型的建立[J]. *华西口腔医学杂志*, 1994, **12**(4): 298~300
- 7 Zhang Tong, Wang Yanrong. The construction of three-dimensional finite element model of human maxillary complex[J]. *Chinese J. Stomatology*, 2000, **35**(5): 374~377
- 张彤,王延荣. 上颌骨复合体三维有限元模型的建立[J]. *中华口腔医学杂志*, 2000, **35**(5): 374~377
- 8 S. S. Margulies, K. L. Thibault. Infant skull and suture properties: measurements and implications for mechanisms of pediatric brain injury[J]. *J. Biomech. Eng.*, 2000, **122**(4): 364~371
- 9 Xiong Yarong, Chen Xin, Liu Hongchen *et al.*. Three-dimensional finite element analysis of implant in human maxillary complex[J]. *J. General Hospital of Air Force*, 2002, **18**(2): 69~72
- 熊亚茸,陈新,刘洪臣等. 种植体在上颌骨复合体前、中、后应力的比较[J]. *空军总医院学报*, 2002, **18**(2): 69~72
- 10 S. Kumaresan, S. Radhakrishnan. Importance of partitioning membranes of the brain and the influence of the neck in head injury modeling[J]. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 1996, **34**(1): 27~32
- 11 K. Voo, S. Kumaresan, F. A. Pintar *et al.*. Finite-element models of the human head[J]. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 1996, **34**(5): 375~381
- 12 J. S. Ruan, T. Khalil, A. I. King. Dynamic response of the human head to impact by three-dimensional finite element analysis[J]. *J. Biomech. Eng.*, 1994, **116**(1): 44~50
- 13 Ji Lingfei, Du Xinyu, Fu Zongyi *et al.*. Laser sintering technique for functional ceramics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 31~35
- 季凌飞,杜新宇,付宗义等. 多种功能陶瓷的激光烧结技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 31~35
- 14 Zhou Bing, Zhao Yimin, Wu Guofeng *et al.*. Application of selective laser sintering in fabricating nasal prostheses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1644~1648
- 周冰,赵钦民,吴国锋等. 选区激光烧结成型技术在鼻腭复体制作中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1644~1648
- 15 Wu Jiang, Gao Bo, Tan Hua *et al.*. Titanium base of complete denture fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1139~1142
- 吴江,高勃,谭华等. 激光快速成形技术制造全口义齿钛基托[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1139~1142