

综述

快速成型三维实物模型在脊柱外科中的应用进展

陈玉兵, 陆 声, 徐永清

(成都军区昆明总医院全军骨科中心 昆明医学院昆明总医院临床学院 650032 昆明市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2009.10.16

中图分类号: R682.3, R319

文献标识码: A

文章编号: 1004-406X(2009)-10-0784-04

由于脊柱解剖结构的复杂性, CT、MRI、X 线片等医学影像资料有时难于为复杂的脊柱外科手术提供足够的解剖学信息, 对于那些由于解剖畸变而导致病理形态改变的脊柱尤其如此。尽管二维、三维重建医学影像能使复杂的脊柱解剖结构获得更好的显示^[1-4], 但有时仍然难以满足复杂脊柱外科手术的需要。1999 年 D'Urso 报道了快速成型脊柱三维实物模型的制作过程及其临床应用^[5], 初步表明快速成型脊柱三维实物模型是进行术前规划及和患者沟通交流的有用工具, 之后快速成型三维实物模型在脊柱外科中的应用研究逐渐增多^[6-18]。笔者通过复习近年来国内外有关文献, 将这方面的应用研究进展情况综述如下。

1 快速成型脊柱三维实物模型的制作

1.1 逆向工程

脊柱三维实物模型的制作主要通过逆向工程(reverse engineering, RE)结合快速成型技术(rapid prototyping, RP)获得。RE 是 20 世纪 80 年代后期出现在制造领域里的新技术, 是计算机辅助设计(computer aided design, CAD)领域中一个相对独立的范畴。RE 是对产品设计过程的一种描述, 与传统的“产品概念设计-产品 CAD 模型-产品(物

理模型)”的正向工程相反, 它是利用各种数字化设备对现有的实物进行扫描和测量, 获得密集的空间点资料, 然后通过计算机技术处理得到实物的数字模型并结合快速成型技术制造出三维实体产品的过程^[19, 20]。RE 一般分为 4 个技术阶段: (1)实物原形的数字化, 通常采用三坐标测量机或激光扫描等测量装置来测量获取实物原形表面点的三维坐标值。此外还有层析法、光学测量、CT 断层扫描图像法、立体视觉测量法等来获取原形的数字信息。(2)从测量的数据中提取实物原形的几何特征, 当实物原形数字化测量后形成一系列的空间点信息, 应用计算机技术, 采用几何特征匹配与识别等方法来获取实物原形所具有的设计与加工特征, 为构造实物原形的 CAD 模型打下基础。(3)实物原形 CAD 模型的重建, 将分割拟合后的三维数据在 CAD 系统中做表面模型的曲面接合, 并通过各表面片的求交与拼接可获取实物原形表面的 CAD 模型。(4)新建 CAD 模型的检验与修正, 根据获得的 CAD 模型加工出样品, 用来检验重建的 CAD 模型是否满足精度或其他试验性能指标, 对不满足要求者, 重复以上过程, 直至达到产品的设计要求, 在此过程中需要和快速成型、数控加工等技术结合来加工样品, 以提高精度和速度。

目前, 已有较多的逆向工程软件开始应用在医学领域, 如美国 EDS 公司的 UG Imageware, 比利时 Materialise 公司的 MIMICS, 美国 Raindrop 公司的 Geomagic Studio,

第一作者简介: 男(1970-), 主治医师, 硕士研究生, 研究方向: 脊柱解剖与临床, 四肢创伤修复与重建
电话: (0871)4474657 E-mail: chenlubingsd@126.com

8. Ibrahim K, Benson L, Cotrel-Dubousset. Instrumentation for double major right thoracic left lumbar scoliosis, the relation between frontal balance, hook configuration and fusion level[J]. Orthop Trans, 1991, 15(1): 114.
9. Lenke LG, Edwards CC II, Bridwell KH. The Lenke classification of adolescent idiopathic scoliosis: how it organizes curve patterns as a template to perform selective fusions of the spine[J]. Spine, 2003, 28(20 Suppl): 199-207.
10. Patel PN, Upasani VV, Bastrom TP. Spontaneous lumbar curve correction in selective thoracic fusions of idiopathic scoliosis: a comparison of anterior and posterior approaches[J]. Spine, 2008, 33(10): 1068-1073.
11. 贾惊宇, 孙英伟, 张立军. 特发性脊柱侧凸患者两侧椎旁肌横截面积的 CT 测量[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2009, 19(3): 208-211.

12. 吴亮, 邱勇, 王斌, 等. 脊柱侧凸椎旁肌纤维不对称性分布的研究[J]. 脊柱外科杂志, 2004, 2(5): 276-279.
13. Kuklo TR, Lenke LG, Graham EJ, et al. Correlation of radiographic, clinical, and patient assessment of shoulder balance following fusion versus nonfusion of the proximal thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis [J]. Spine, 2002, 27(18): 2013-2020.
14. Edwards CC II, Lenke LG, Peelle M. Selective thoracic fusion for adolescent idiopathic scoliosis with C modifier lumbar curves: 2 to 16-year radiographic and clinical results [J]. Spine, 2004, 29(5): 536-546.

(收稿日期: 2009-03-04 修回日期: 2009-08-21)

(英文编审 郭万首)

(本文编辑 卢庆霞)

韩国 INUS 公司的 Rapidform 等, 其中 UG Imageware 和 MIMICS 是目前医学临床研究中应用最为广泛的两种软件。UG Imageware 是集 CAD\CAM\CAE 一体化的三维参数化软件, 是著名的计算机辅助设计、制造和分析软件, 具有强大的测量数据处理、误差检测、自由曲线曲面编辑等功能, 能以直觉而快速的方式进行曲线曲面的建构与调整; 其主要模块有: Surfacer (逆向工程工具和 class 1 曲面生成工具)、Verdict (对测量数据和 CAD 数据进行对比评估)、Build it (提供实时测量能力, 验证产品的制造性)、RPM (生成快速成型数据)、View (功能与 Verdict 相似, 主要用于提供三维报告) 等。MIMICS 是基于医学 CT、MRI 图像三维重建和快速成型应用的专业软件, 软件可显示和分割 CT、MRI 和超声等医学图像, 自动设置图像识别范围、像素间距、图像层距等参数, 并有良好的图像编辑功能。可以将断层扫描的结果转化成为机械领域中 CAD\CAM 软件可以处理的数据格式, 是医学断层扫描和机械工程之间的接口软件。其主要模块有 CT-Convert (读取 CT 等医学断层图像数据为 Materialise 图像格式)、CTM (插入医学分层数据为很薄层面, 可直接与大部分 RP 系统形成接口)、Csup (自动计算 RP 模型制作时所需要的支撑结构)、MedCAD (使医学扫描数据成为可以在任何 CAD 系统中直接进行假体设计的表面文件)。

1.2 快速成型技术

快速成型 (RP) 技术于 20 世纪 80 年代起源于机械 Engineering 领域, 是集新型材料科学、计算机辅助设计、数控技术、激光技术为一体, 基于离散、堆积原理逐层累加进行物理模型快速制作的综合技术^[20]。其突出特点是分层叠加、善于制造复杂实体且具有较高的精确度。RP 技术根据成型方法可分为 2 类: 基于激光及其他光源的成型技术, 如光固化成型 (stereo lithography apparatus, SLA)、分层实体制造 (laminated object manufacturing, LOM)、选域激光烧结 (selected laser sintering, SLS) 等; 基于喷射的成型技术, 如熔融沉积成型 (fused deposition modeling, FDM)、三维印刷 (three-dimensional printing, TDP) 等。目前各种快速成形技术已广泛应用于颌面外科、神经外科、矫形外科等医学领域中^[5-18, 21-28]。其中, SLA 是 RP 的典型技术之一, 也是医学领域中最常用的 RP 技术。它以光敏树脂为原料, 通过计算机分层控制紫外激光在树脂表面逐点扫描, 扫描区的树脂产生光聚合反应而固化形成一个薄层。然后工作台下降一个层厚的距离, 使固化好的树脂表面再敷上一层新液体树脂后进行下一层的扫描加工。如此重复直到获得一个三维实体原型^[29, 30]。脊柱三维实物模型多采用 SLA 技术制作, 少数采用 FDM 技术制作, 医学影像资料均通过 CT 扫描获得, 制造出的脊柱实物模型和实物之间的误差在 0~1mm 之间^[5-18]。

1.3 脊柱三维实物模型的制作流程

首先对要建模的脊柱进行 CT 连续扫描, 将获得的 CT 扫描数据导入三维重建软件, 用计算机辅助设计生成

三维重建数字模型并转换成快速成形机可接受的数据格式, 然后利用快速成型技术精确成形三维脊柱实物模型^[5-18]。

2 快速成型脊柱三维实物模型在脊柱外科中的应用

2.1 在脊柱畸形中的应用

脊柱实物模型能够清晰显示畸形椎体的形态、异常生长的终板、脊柱裂等, 术前通过观察实物模型可以发现 CT、MRI 及 X 线平片等医学影像资料无法显示的解剖学信息, 对脊柱畸形的解剖学形态获得正确的理解, 为手术方案的制定提供必要的参考, 同时可以通过脊柱实物模型进行模拟手术操作。D'Urso 等^[5]报告通过术前观察脊柱实物模型成功对 2 例复杂的先天性颈椎及颈胸椎畸形患者进行了畸形矫正手术。van Dijk 等^[6]报告通过对 1 例严重胸腰椎脊柱后凸畸形及 1 例 L4/5 椎体前移滑脱导致的腰椎前凸患者的脊柱实物模型进行术前规划及模拟手术, 成功实施了骨切除、截骨矫形及内固定置入手术。王征等^[7]术前通过脊柱实物模型结合患者的其他影像学资料对 6 例复杂脊柱侧后凸畸形患者制定手术方案、选择内固定方法, 术中通过模型指导手术操作, 根据模型判断畸形椎体椎弓根的位置和方向, 指导椎弓根螺钉等内固定器械的置入, 结果 6 例患者均按计划顺利完成了手术, 矫形和内固定满意, 椎弓根螺钉位置正确。肖进等^[8]通过脊柱实物模型的应用在 6 例脊柱侧凸患者的畸形矫正手术中取得了同样满意的效果。张强等^[9]对 4 例严重先天性脊柱侧凸患者术前通过脊柱模型进行了手术规划及模拟手术, 并随机抽取未做脊柱模型的 4 例严重脊柱侧凸患者作对照研究, 结果应用脊柱模型的 4 例患者手术完成顺利, 矫形和内固定满意, 平均手术时间 186min, 平均术中失血量 460ml; 未应用脊柱模型的 4 例平均手术时间 215min, 平均手术失血量 500ml。桑宏勋等^[10]通过术前观察脊柱实物模型进行脊柱畸形情况评估、设计手术方案, 术中在脊柱模型指导下进行手术操作, 对 34 例重度先天性脊柱畸形患者 (其中半椎体畸形 22 例、腰椎严重后凸 6 例、半椎体合并分节不全等混合畸形 6 例) 进行了单纯后路畸形矫正及全节段椎弓根螺钉固定手术; 结果术中所见与术前三维重建和脊柱模型显示结果完全一致; 术后 X 线平片及 CT 三维扫描显示矫形和内固定效果满意, 椎弓根螺钉位置良好, 所有先天性半椎体切除彻底; 未出现任何脊髓、神经及血管损伤等并发症。

2.2 在脊柱肿瘤中的应用

术前通过观察实物模型可明确需要切除的病变部位和范围, 肿瘤与椎体及脊神经根的解剖关系, 从而制定最佳手术方案。D'Urso 等^[5]报告通过术前观察实物模型成功对 1 例已侵犯至枕骨大孔及 C3 的 C2 颈椎骨肉瘤肿瘤进行了完整切除。van Dijk 等^[6]报告对 4 例脊椎肿瘤 (1 例颈椎、2 例胸椎、1 例骶椎) 患者的脊柱实物模型进行术前规划, 模拟肿瘤切除和重建手术, 并根据模型定做了重建

需要的置入假体及内固定装置,结果所有模型都为术前和术中规划提供了必要的信息,使手术得以顺利完成,术中证实定做的置入假体及内固定装置十分准确。

2.3 在脊柱骨折脱位中的应用

Yamazaki 等^[11]通过对 1 例陈旧性 C4/5 骨折脱位患者脊柱实物模型的术前观察、手术模拟,制定了椎板切除减压、前路植骨融合、后路椎弓根钉棒系统内固定的手术方案,使手术得以顺利实施,同时脊柱实物模型也为椎弓根螺钉的置入提供了准确的解剖标志。

2.4 定制内固定装置

可根据手术需要最终固定位置时的实物模型术前定制最合适的内固定装置,用于术中内固定。Mizutani 等^[12]对 15 例患有颈椎风湿病需做颈椎关节融合的患者在术前制作了枕部及颈椎实物模型,他们的做法是在进行 CT 检查时将患者置于枕颈部最舒适的体位,然后通过这些 CT 资料采用 SLA 技术制作出实物模型,通过枕颈部实物模型的后部表面定做了固定用的板-杆固定装置模板,板-杆固定装置模板便具有患者处于最舒适体位的枕颈角,同时从各个方面观察实物模型,在模型上寻找颈椎椎弓根螺钉最佳进钉点、进钉通道及合适的螺钉直径和长度,并在模型上模拟椎弓根螺钉固定手术,为术中椎弓根螺钉的固定提供参考,手术时根据板-杆固定装置模板的形状对板-杆固定装置进行塑形后固定,术后所有患者均未采用 Halo-Vest 外固定,颈部位置舒适,均无吞咽困难,椎弓根螺钉置入准确,患者免除了 Halo-Vest 外固定的烦恼。

2.5 指导椎弓根螺钉的置入

术前通过实物模型可了解椎弓根在脊柱后方的解剖标志点及其走形轨道,为术中椎弓根螺钉的置入提供参考,或进一步制造出椎弓根定位导航模板直接用于术中椎弓根螺钉的置入。D'Urso 等^[13]制作了 20 个需要做椎弓根螺钉置入内固定的脊柱患者的实物模型(包括颈椎、胸椎和腰椎),他们采用的材料是透明的丙烯酸树脂,这种材料使椎弓根的走形轨道在各个方向都能被清楚的看到,手术前用电钻在脊柱实物模型上通过椎弓根的走形轨道钻出椎弓根螺钉的最佳置入通道,在通道内放置长 10cm 的金属轨道钉,椎弓根螺钉的置入长度可通过金属轨道钉在脊柱实物模型上的测量获得。其中有 5 例同时采用冷凝集的丙烯酸骨水泥在脊柱实物模型和通道内放置的金属轨道钉上制造出椎弓根定位钻孔导向模板,这些模板和脊柱模型的后表面相匹配,术前将脊柱实物模型和通道内放置的金属轨道钉及椎弓根定位钻孔导航模板消毒,术中参考脊柱实物模型和通道内放置的金属轨道钉确定椎弓根螺钉的置入部位和方向,或者直接将椎弓根定位钻孔导向模板放置于相应椎体表面直接指导椎弓根螺钉的置入,结果表明通过上述方法寻找椎弓根螺钉的最佳置钉通道具有高度准确性,术后 CT 证实所有螺钉均置入准确。陆声等^[14,15]和师继红等^[16]采用逆向工程原理直接在脊柱三维重建数字模型上寻找椎弓根的最佳进钉通道,并提取椎板的表面

解剖学形态,建立与椎体后部解剖形态学一致的模板,将模板和椎弓根的最佳进钉通道拟合为一体形成椎弓根定位导航模板,采用快速成型技术同时将脊柱实物模型和椎弓根定位导航模板直接生产出来,术前在体外将脊柱实物模型和椎弓根定位导航模板进行贴合,进行椎弓根螺钉进钉模拟,通过脊柱实物模型观察通过椎弓根定位导航模板置钉的准确性,术中将消毒后的椎弓根定位导航模板贴附于相应椎体后部,直接指导椎弓根螺钉的置入,他们报道初步应用该法在 3 例外伤后颈椎脱位患者中置入颈椎椎弓根螺钉 12 枚,在 6 例胸腰椎骨折患者中置入胸腰椎椎弓根螺钉 28 枚,所有椎弓根螺钉置入顺利。术中仅需手术完成后透视 1 次,透视次数较常规手术明显减少。经术后 X 线及 CT 检查证实所有椎弓根螺钉进钉部位和方向准确,长度和直径选择合适。

3 快速成型脊柱三维实物模型的临床应用价值

Izatt 等^[17]对脊柱实物模型在复杂脊柱外科中的临床应用价值进行了量化研究,他们共在 26 例患者(其中脊柱畸形 21 例,脊柱肿瘤 5 例)中应用了 28 个脊柱实物模型,术前通过脊柱实物模型进行手术规划,定制置入物,为手术提供解剖学参考,结果显示,65%的病例中通过脊柱实物模型能够获得比 CT、MRI、X 线平片等医学影像资料更加详细的解剖学信息;11%的病例中只有在脊柱实物模型上才能获得手术所需要的解剖学信息,其他医学影像资料无法提供。通过术前应用脊柱实物模型在 52%的病例中导致置入物置入决策的改变,74%的病例导致置入物置入部位的改变。脊柱实物模型的应用能减少脊柱肿瘤手术操作时间的 8%,减少脊柱畸形手术操作时间的 22%。手术证实 58%的脊柱实物模型解剖和术中解剖几乎完全相同,39%的脊柱实物模型解剖和术中解剖完全相同,只有 1 例(3%)脊柱实物模型和术中解剖稍有差异。

另外,通过应用脊柱实物模型能够和患者本人及家属进行更好的交流沟通,便于手术团队之间的交流沟通,最大限度地减少分歧和失误。Guarino 等^[18]的研究结果表明,脊柱实物模型对术前规划、术中提供参考十分有用,通过应用脊柱实物模型能够增加小儿脊柱外科手术的安全性,减少手术操作时间,能够和患者家属进行更好地交流沟通。桑宏勋等^[19]认为术前利用脊柱实物模型有助于选择内固定种类;确定螺钉直径、长度、角度,预弯内固定棒;判断脊髓和神经走行;确定截骨角度和范围;明确椎弓根缺失及椎体复杂畸形形状;能够最大限度地减少手术创伤,增加螺钉置入的准确性与稳定性,降低手术风险。

4 存在的不足和展望

脊柱三维实物模型和真正的解剖实体之间还存在一定的误差,其精确度还有待进一步提高。另外,脊柱实物模型的制作时间较长,需要一定的费用,据目前文献报道每个脊柱实物模型的制作时间大概在 2~10d 左右,花费为

600~2000 美元^[5,6,18],这在一定程度上限制了其应用。相信随着科学技术的发展,脊柱三维实物模型的精确度会不断获得提高,制作时间会越来越短,费用也会越来越低。由于脊柱实物模型具有直观性、可触摸性,常常能显示出一些脊柱外科所必须的、但 CT、MRI 及 X 线平片等医学影像资料又无法显示的隐藏信息,可使脊柱外科医师对复杂的脊柱解剖和病理改变有一个清晰的立体认知,据此进行术前和术中规划,优化手术方案,定制置入假体和内固定装置,并在脊柱实物模型上进行手术模拟,确保手术能够安全、高质量的完成,缩短手术时间,提高手术成功率,脊柱实物模型在脊柱外科尤其是在复杂脊柱外科的临床应用中具有广阔的发展前景。

5 参考文献

- Liljenqvist UR, Allkemper T, Hackenberg L, et al. Analysis of vertebral morphology in idiopathic scoliosis with use of magnetic resonance imaging and multiplanar reconstruction [J]. J Bone Joint Surg Am, 2002, 84(3):359-368.
- 张永刚, 王岩, 刘郑生, 等. 数字化三维重建技术定量评估青少年特发性脊柱侧弯胸椎椎弓根的形态变化[J]. 中国临床康复, 2005, 9(22):13-15.
- Parent S, Labelle H, Skalli W, et al. Thoracic pedicle morphometry in vertebrae from scoliotic spines [J]. Spine, 2004, 29(3):239-248.
- Liau KM, Yusof MI, Abdullah MS, et al. Computed tomographic morphometry of thoracic pedicles; safety margin of transpedicular screw fixation in Malaysian Malay population [J]. Spine, 2006, 31(16):545-550.
- D'Urso PS, Askin G, Earwaker JS, et al. Spinal biomodeling[J]. Spine, 1999, 24(12):1247-1251.
- Van Dijk M, Smit TH, Jiya TU, et al. Polyurethane real-size models used in planning complex spinal surgery [J]. Spine, 2001, 26(17):1920-1926.
- 王征, 王岩, 毛克亚, 等. 脊柱数字化重建与快速成型对复杂脊柱畸形矫治的意义[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2006, 16(3):212-214.
- 肖进, 尹庆水, 张美超, 等. [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(35):6835-6838.
- 张强, 邹德威, 马华松, 等. 快速成型脊柱模型在脊柱外科的初步应用[J]. 颈腰痛杂志, 2007, 28(6):451-453.
- 桑宏勋, 雷伟, 马真胜, 等. 快速成型技术在重度先天性脊柱畸形矫形手术中的应用 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2008, 18(3):196-200.
- Yamazaki M, Okawa A, Akazawa T, et al. Usefulness of 3-dimensional full-scale modeling for preoperative simulation of surgery in a patient with old unilateral cervical fracture-dislocation[J]. Spine, 2007, 32(18):532-536.
- Mizutani J, Matsubara T, Fukuoka M, et al. Application of full-scale three-dimensional models in patients with rheumatoid cervical spine [J]. Eur Spine J, 2008, 17(5):644-649.
- D'Urso PS, Williamson OD, Thompson RG. Biomodeling as an aid to spinal instrumentation [J]. Spine, 2005, 30(24):2841-2845.
- 陆声, 徐永清, 李严兵, 等. 脊柱椎弓根定位数字化导航模板的设计[J]. 中华创伤骨科杂志, 2008, 10(2):128-131.
- 陆声, 徐永清, 张元智, 等. 计算机辅助导航模板在下颈椎椎弓根定位中的临床应用[J]. 中华骨科杂志, 2008, 28(12):1002-1007.
- 师继红, 陆声, 张元智, 等. 数字化脊柱椎弓根导航模板在胸腰椎骨折中的应用 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2008, 10(2):138-141.
- Izatt MT, Thorpe PL, Thompson RG, et al. The use of physical biomodelling in complex spinal surgery[J]. Eur Spine J, 2007, 16(19):1507-1518.
- Guarino J, Tennyson S, McCain G, et al. Rapid prototyping technology for surgeries of the pediatric spine and pelvis: benefits analysis[J]. J Pediatr Orthop, 2007, 27(8):955-960.
- 立久权, 王平, 王永强, 等. 逆向工程及其在 CAD 软件中的实现[J]. 微计算机信息, 2006, 22(8):141-143.
- 段彦静, 孙文磊. 逆向工程和快速成型技术及医学应用[J]. 医疗卫生装备, 2006, 27(10):31-34.
- Sykes LM, Parrott AM, Owen CP, et al. Applications of rapid prototyping technology in maxillofacial prosthetics [J]. Int J Prosthodont, 2004, 17(4):454-459.
- Galantucci LM, Percoco G, Angelelli G, et al. Reverse engineering techniques applied to a human skull, for CAD 3D reconstruction and physical replication by rapid prototyping [J]. J Med Eng Technol, 2006, 30(2):102-111.
- Brown GA, Firoozbakhsh K, DeCoster TA, et al. Rapid prototyping: the future of trauma surgery [J]. J Bone Joint Surg Am, 2003, 85(Suppl 4):49-55.
- 常敏, 郭英, 邓乐巧, 等. 快速成型技术在骨科中的临床应用[J]. 中国矫形外科杂志, 2006, 14(17):1297-1298.
- Goffin J, Van Brussel K, Martens K, et al. Three-dimensional computed tomography-based, personalized drill guide for posterior cervical stabilization at C1-C2 [J]. Spine, 2001, 26(12):1343-1347.
- Van Cleynenbreughe J, Schutyser F, Goffin J, et al. Image-based planning and validation of C1-C2 transarticular screw fixation using personalized drill guides [J]. Comput Aided Surg, 2002, 7(1):41-48.
- Berry E, Cuppone M, Porada S, et al. Personalised image-based templates for intra-operative guidance [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2005, 219(2):111-118.
- Owen BD, Christensen GE, Reinhardt JM, et al. Rapid prototype patient-specific drill template for cervical pedicle screw placement[J]. Comput Aided Surg, 2007, 12(5):303-308.
- Winder J, Bibb R. Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery [J]. J Oral Maxillofac Surg, 2005, 63(7):1006-1015.
- Lohfeld S, Barron V, McHugh PE. Biomodels of bone: a review [J]. Ann Biomed Eng, 2005, 33(10):1295-1311.

(收稿日期:2008-11-17 修回日期:2008-12-29)

(本文编辑 彭向峰)