

[文章编号] 1000-1182(2011)04-0339-05

· 专家论坛 ·

基于X线和激光扫描的颅面部三维重建与手术模拟系统的研究

周洪¹ 张艳宁² 冯耀普¹ 侯玉霞¹

(1.西安交通大学口腔医院 正畸科, 西安 710004; 2.西北工业大学 计算机学院, 西安 710068)

[摘要] 牙颌面畸形的发病与治疗均涉及颅面部颌骨、牙齿、软组织的三维空间结构改变。对颅面部形态进行三维的测量与分析多年来一直是国内外学者研究的热点问题。目前,对于单一组织都能较为精确捕获它们的三维信息,但是单一组织不能全面反映颅颌面各部分之间的解剖关系,因此多结构多方法联合重建成为形态学研究的方向。本课题组用头颅定位X线片和激光扫描获取颅面部软硬组织图像数据,研究开发颅面部软硬组织三维重建及正颌手术模拟、预测系统,为颅面畸形的诊断、治疗方案确定和定量控制、预后评估提供新的途径。

[关键词] 头颅定位X线片; 三维重建; 激光扫描; 颅面复合体

[中图分类号] R 782.2 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.3969/j.issn.1000-1182.2011.04.001

Three-dimensional reconstruction and orthognathic surgery simulation system of craniofacial region based on cephalograms and laser scanning Zhou Hong¹, Zhang Yanning², Feng Yaopu¹, Hou Yuxia¹. (1. Dept. of Orthodontics, Stomatological Hospital, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, China; 2. Dept. of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710068, China)

[Abstract] Craniofacial malformation was related to the shape and structure of the teeth, jaws and face. Assessment of craniofacial complex in three-dimensional(3D) has long been a focus for many researchers. At present, 3D imaging techniques could reconstruct the craniofacial soft tissue or hard tissue successfully. However, they couldn't reflect the comprehensive structure of craniofacial complex. For the study of the craniofacial complex, combination of 3D imaging techniques provides a promising way toward optimum 3D imaging. The purpose of this study was to reconstruct the 3D images of craniofacial hard and soft tissue based on cephalograms and laser scanning, to found the 3D measurement and orthognathic simulation and forecast system, which may provide a new method for analyzing of craniofacial malformation, and for the quantity control and evaluation of treatment results in the orthodontic treatment, orthopedics and plastic operation.

[Key words] cephalogram; three-dimensional reconstruction; laser scanning; craniofacial complex

颅颌面的畸形常表现为颌骨、牙齿、软组织三维空间结构的异常,三维的颅面部形态分析能够提供更准确和全面的信息用于畸形的诊断和治疗方案的制定。以往对于颅面部三维形态重建的方法包括X线片、CT扫描、核磁共振、莫尔云纹、立体摄影、激光扫描等。这些方法虽然都可以建立三维模型,但都存在着一定的缺点,如精度不足、射线暴露多、重建技术复杂等,阻碍了它们在临床上的推广使用。

X线头影测量技术自1931年由Broadbent开创以来,在正畸与正颌外科临床中应用最为广泛,是研

究颅面生长发育、牙颌畸形的重要手段。随着数字化头影X线片的问世,为基于X线片的三维重建带来更好的应用前景^[1]。激光扫描三维重建技术是目前最先进的形态学研究技术,具有成像快、精度高、操作方便的特点。本课题组拟采用数字化X线摄影和激光扫描的方法,建立一种易于操作、快速重建、射线暴露少的面部软硬组织三位重建和测量分析系统,为颅面畸形的诊断、治疗计划制定和定量控制、预后评估提供新的途径。

1 基于X线片的颅面部硬组织三维重建

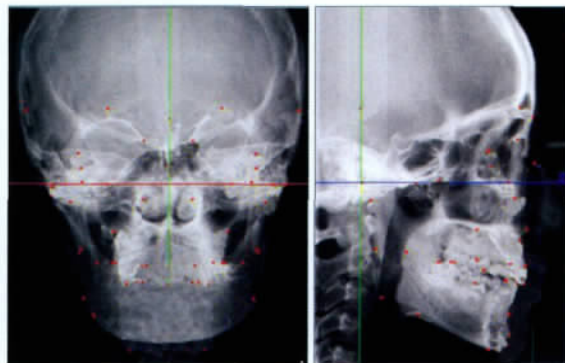
双平面X线立体摄影技术是目前常用的三维重建方法,它基于双目视觉的原理,用2张同期拍摄的正交X线片建立三维坐标系,获得颅面部标志点的三

[收稿日期] 2010-10-29; [修回日期] 2011-04-10

[作者简介] 周洪(1957—),男,湖北人,教授,学士

[通讯作者] 周洪, Tel: 029-87281409

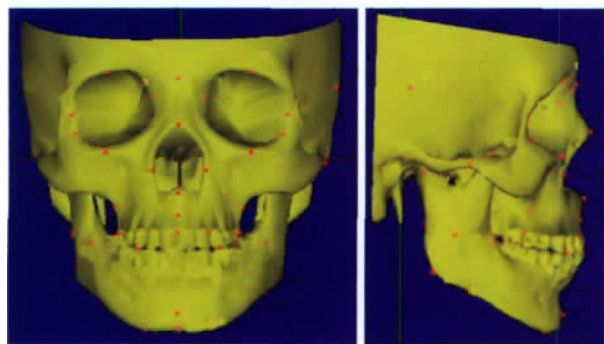
维坐标, 从而进行距离、角度及比例指数的测量, 将标志点连接描绘颅颌骨骼结构的三维框线图^[2-3]。Nguyen等^[4]在干头颅的正侧位片上选定121个特征点, 在三维坐标系中将这此点连接, 特征点之间通过线性平滑处理, 最终生成骨组织的三维轮廓图。由于受标志点数量的制约, 故三维框线图及轮廓图都不能准确地反映颅面部三维形态, 不利于牙颌畸形的观察、手术模拟和形态预测。基于CT影像的三维重建技术能够立体、逼真地再现颅颌面解剖形态, 但是薄层CT(1~1.5 mm)扫描带来的过多射线暴露严重限制了它的临床应用。鉴于X线及CT建模的特点, 本课题组采用以CT头颅标准模板为基础的形变建模方法, 首先选择7个正常面型的志愿者建立CT头颅标准模板, 进一步将头颅定位X线片上标定的64个特征点(图1), 与CT标准模板上相应的点匹配、模板形变后, 即可获得具有个体面型特征的颅面部硬组织三维模型(图2)。



左: 正位片; 右: 侧位片。

图1 头颅定位X线片上标定特征点

Fig 1 Cephalograms with feature points



左: 正位片; 右: 侧位片。

图2 CT头颅标准模板标定特征点

Fig 2 CT standard model with feature points

2 基于激光扫描的颅面部软组织及牙颌模型三维重建

基于光学三角测量原理的三维激光扫描能够获得物体表面各采样点的三维坐标, 构建物体的三维数字模型。Moss等^[5-6]最早将氦氖激光扫描用于面部

软组织的三维形态的测量研究。近年来随着硬件和测定计算方式的改良, 新型的激光扫描系统具有更高的精确度和方便性。Kusnoto等^[7]对牙颌模型和面部三维激光扫描精度的研究显示: 磨牙宽度测量精度为0.2 mm, 上腭深度测量精度为0.7 mm, 面部模型的精度达到(1.9±0.8) mm。Kovacs等^[8]在对面部三维建模标准的研究中, 利用Vivid910激光扫描仪在不同实验条件下对5位志愿者进行扫描, 分析获得最佳扫描精度的条件。国内的学者刘林等^[9]利用Vivid910型三维激光扫描仪采集2例面部畸形患者信息重建其面部图像, 并开发可进行13个定点、3项线距、2个角度测量的测量系统。龙丽华等^[10]利用Vivid910型三维激光扫描仪采集28名个别正常颌志愿者面部软组织数据, 并进行43个标志点、104项三维自动测量, 通过与直接测量法的比较研究表明: 71%的点距测量差值小于2 mm, 16%的点距测量差值为2~3 mm。

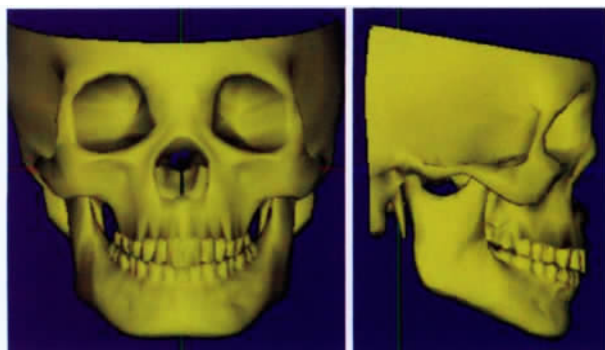
3 基于X线片及激光扫描的颅面部三维重建系统

完整的颅面部三维模型应包括骨组织、软组织、牙颌模型三维信息。单一的技术很难实现颅面部软硬组织的同期重建, 以往的联合重建方法有激光与CT、激光与X线片、颅面部及牙颌模型的激光扫描、CT与立体摄影、CT与照片等; 但是, 目前还没有一种联合重建的方法能够满足临床应用的要求。

激光扫描与数字化X线片联合重建, 具有操作方便, 射线暴露量低, 软组织重建准确的优点。1999年, Okumura等^[3]利用头颅正侧位X线片, 基于双平面摄影原理重建各解剖标志点的三维坐标, 并用标志点构成颅颌面骨骼三维框线图; 同时利用激光扫描获取牙颌模型的三维图像, 再将二者拟合, 构建了具有三维功效的图像。2005年, Nakasima等^[11]利用头颅X线片、面部照片及牙颌模型初步建立了头部的三维模型。2007年, Noguchi等^[12]利用激光扫描获取面部软组织和牙颌模型的三维数据, 然后在Surface图像软件的帮助下, 利用映射匹配技术将其整合到由头颅正侧位X线片所确立的参考坐标系中, 再与形变后的下颌骨模板结合, 得到了带有牙齿的下颌骨及软组织三维模型, 并对1名下颌后退手术患者进行了术后容貌预测。该方法结合的下颌骨形变技术, 是对以往建模手段的大胆创新, 但是由于未形成完整的颅颌硬组织形态, 使其在临床应用中受限。

以二维头颅正侧位X线片为数据源, 对CT头颅标准模板进行形变, 可得到具有患者面部特征的硬组织三维模型(图3)。激光扫描获得面部软组织和牙颌模型的三维数据。在同一坐标系中实现牙颌模型和硬组织的匹配、软组织模型和硬组织模型的拟合,

形成完整的颅颌面硬、软组织三维结构模型(图4)。



左: 正面观; 右: 侧面观。

图 3 颅面部硬组织三维模型

Fig 3 3D craniofacial hard tissue model

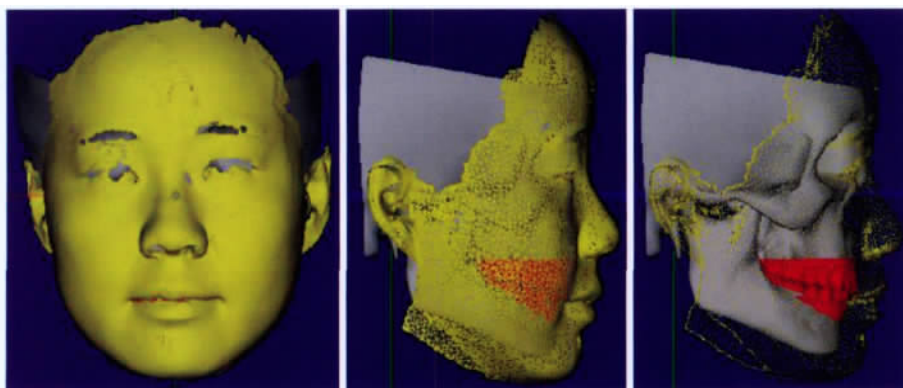
4 三维正颌手术模拟和预测系统的研究

目前, 计算机辅助的颅颌面三维手术模拟、预

测系统有两种, 其一是基于双平面X线立体摄影技术的三维手术模拟; 其二是基于CT图像的三维手术模拟。

基于双平面X线立体摄影技术的手术模拟是在头颅正、侧位片重建的颅面部三维模型上进行多种正颌手术模式的模拟。1999年, Chen等^[13]利用X线片结合激光扫描的方法建立正颌手术模拟预测系统。该系统先将软、硬组织数据文件输入交互编辑的程序, 再由外科医生在临床检查诊断的基础上决定截骨的方式; 但该方法重建的图像是三维骨骼框线图, 手术模拟预测的效果不够直观。

本课题组在构建出包括颅面部硬、软组织三位一体的模型基础上, 实现了正颌手术虚拟和软组织形态预测。



左: 填充模式; 中: 散点模式; 右: 显示硬组织。

图 4 颅面部硬组织、软组织和牙颌同期重建

Fig 4 3D model of craniofacial hard and soft tissues

在研发软件的Load MultiModel窗口中载入形变重建的三维模型, 根据手术类型选择所需要切割的骨块, 进行骨块移动的模拟。在硬组织移动的基础上, 采用硬软组织移动比率结合曲面插值的方法来预测术后软组织形态。本系统可进行块状切割和多元化切割(图5、6), 不仅能够模拟几种经典的正颌外科术式, 还可以利用系统的多元化切割功能模拟复杂切割方案。

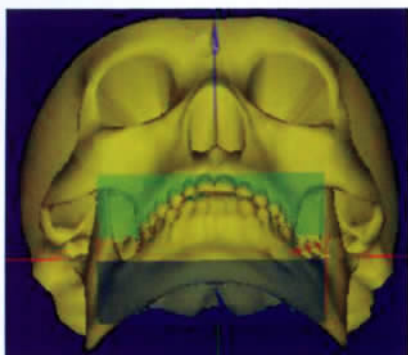


图 5 块状切割

Fig 5 Block osteotomy

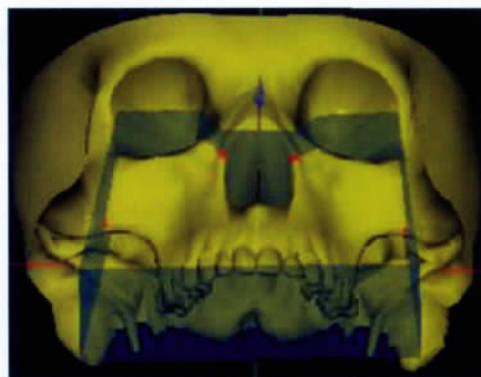
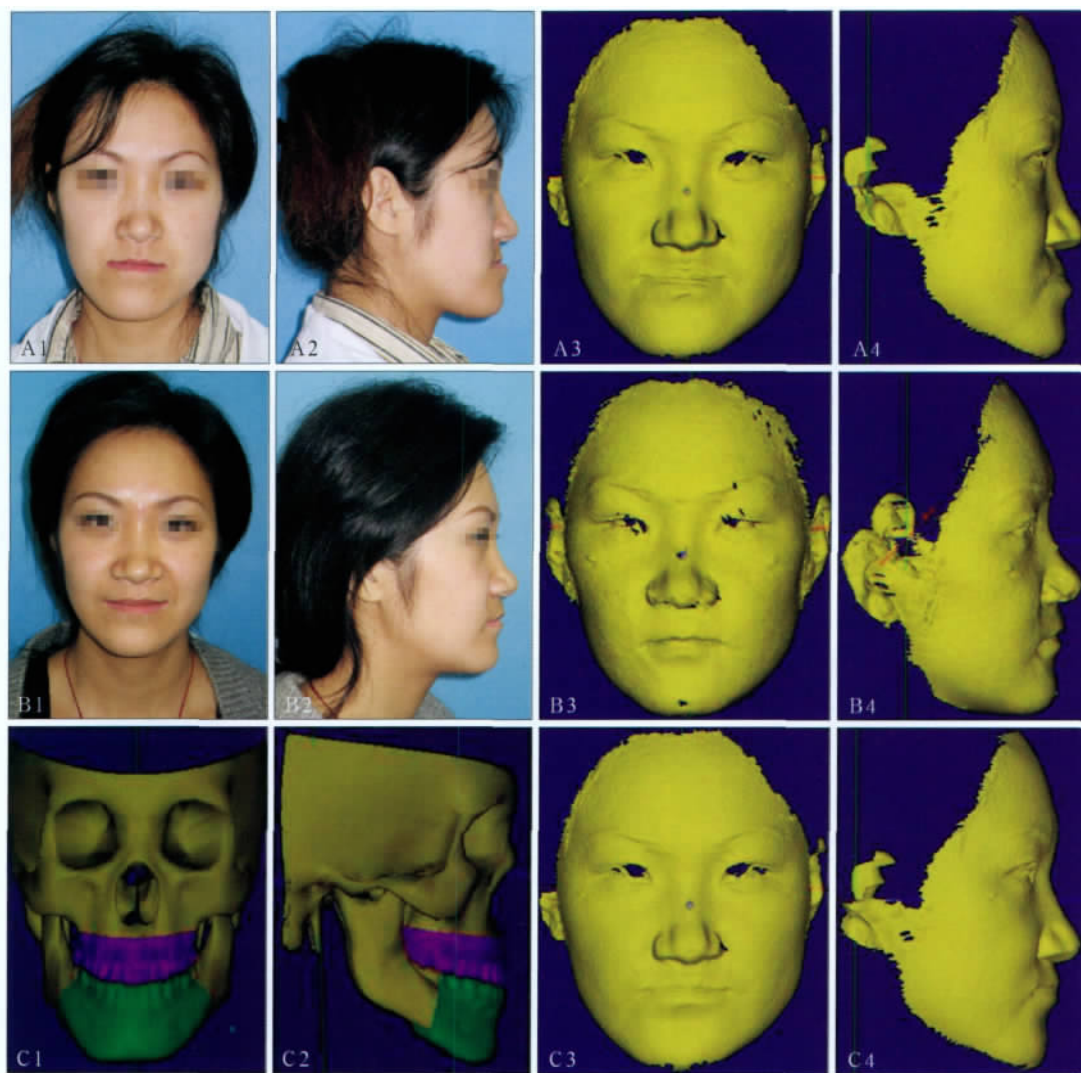


图 6 多元化切割

Fig 6 Three-level osteotomy

本系统提供有7种常用手术模式下的软硬组织位移比率关系, 其中5种单颌手术, 2种双颌手术。在Correlation of Skull and Face窗口下, 分别载入患者术前软组织三维模型, 面部初始特征点和术后面部目标特征点, 利用曲面插值算法对软组织模型进行形变, 得到患者术后的软组织容貌特征, 其手术前和手术后的图像见图7。



A: 手术前; A1: 正面像; A2: 侧面像; A3: 三维模型正面; A4: 三维模型侧面。B: 手术后; B1: 正面像; B2: 侧面像; B3: 三维模型正面; B4: 三维模型侧面。C: 手术预测; C1: 正面骨组织形态预测; C2: 侧面骨组织形态预测; C3: 正面软组织外貌预测; C4: 侧面软组织外貌预测。

图 7 正颌手术模拟与预测

Fig 7 Simulation and facial morphology forecasting of orthognathic surgeries

5 讨论

颅颌面的关系为三维空间结构关系, 颅颌面的畸形常表现为三维空间结构的异常。颅面部复杂的三维结构使其定性描述和定量测量都相当困难。本研究基于X线及激光扫描不仅实现了颅面硬、软组织及牙颌模型单一组织的重建, 并且实现了软组织、硬组织和牙颌模型的高效拟合, 重建了反映颅面结构的三维模型, 从而, 有助于牙颌面畸形的精确判断与分析。

基于CT扫描的颅面部三维重建及手术模拟预测系统具有精确性高、可重复性好的特点, 螺旋CT绘制颅面三维结构的测量准确度平均为0.83%, CT建模测量值之间平均差值仅为0.14 mm, 个体间的测量误差为0.03 mm^[14-15]。国内外也有很多中心建立基于三维CT的颅面部三维重建及模拟仿真系统, 如南加

州大学学者虚拟正颌患者建立了一个数字化的平台, 可以在平台上进行颅颌面护理的模拟、教学和研究。顾泽旭等^[16]开发的正颌外科诊断分析、手术模拟及术后预测系统等。但是高质量的三维重建依赖于超薄层的扫描, 比普通CT检查接受的射线量多4~10倍。由于超薄层扫描电离辐射较大, 故无法建立人群的正常值CT数据库, 无法将畸形患者资料与正常人进行比较。这些原因都限制了CT在口腔临床中的广泛应用。头颅正侧位X线片摄影技术成熟、电离辐射小, 它是正畸、正颌外科治疗的常规检查项目。基于术前常规拍摄的正侧位X线片, 重建患者颅面硬组织三维模型, 避免了术前CT扫描的射线危害, 相对于CT重建, 本系统价格低廉, 图像清晰度较好, 性价比优越。

模型数据量的大小和重建效果密切相关。模板的数据量越高, 重建效果越清晰, 但对计算机硬软

件技术支持要求越高。基于X线片及激光扫描的这一系统,在保证重建效果的基础上,对标准模板和激光扫描数据进行了算法优化,CT标准模板数据量是CT重建结果数据量的1/(30~300),仅403 kb。激光扫描数据重建牙颌模型仅378 kb,软组织仅约1 600 kb。进行软、硬组织和牙颌模型拟合后的完整的三维精细模型,仅约2 300 kb。

基于X线片及激光扫描三维颅面结构正颌手术模拟及软组织形变预测系统,手术模拟过程中,可任意定义截骨平面,不受传统术式限制,有利于术式的改良和创新;骨块截取工作简捷准确,在完成多次切割后尚可进行碎片的拼接;所有操作均可交互式反复进行,以利于获得最佳的手术方案。术后软组织预测系统,除了正中矢状面软硬组织移动比率相关特征点,同时根据不同的术式也加入了三维方向上的软硬组织移动比率相关特征点,结合曲面插值形变预测通过特征点的变化来带动临近点位置的改变,变化比率由特征点向四周呈线性递减,从而使软组织容貌预测结果更精准。

本系统在准确度方面有待进一步研究和改进,采集X线片及激光扫描过程中可能存在面部表情和头位的变化;眶区和鼻区结构复杂区域的形变重建误差较大,重建术后容貌预测主要基于有限的二维软硬组织移动比率关系的数据,尚不足以为软组织的三维变化预测提供精确的指导。相信随着软组织形变算法的完善及软硬组织变化三维数据库的充实,预测结果会更加精准。

[参考文献]

- [1] 陈蓓. 数字X线摄影的应用探讨[J]. 实用预防医学, 2007, 14(5): 1548-1549.
Chen Bei. Application of digital radiography[J]. Practical Preventive Medicine, 2007, 14(5): 1548-1549.
- [2] Grayson B, Cutting C, Bookstein FL, et al. The three-dimensional cephalogram: Theory, technique, and clinical application[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1988, 94(4): 327-337.
- [3] Okumura H, Chen LH, Tsutsumi S, et al. Three-dimensional virtual imaging of facial skeleton and dental morphologic condition for treatment planning in orthognathic surgery[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1999, 116(2): 126-131.
- [4] Nguyen CX, Nissanov J, Öztürk C, et al. Three-dimensional imaging of the craniofacial complex[J]. Clin Orthod Res, 2000, 3(1):

46-50.

- [5] Moss JP, Linney AD, Grindrod SR, et al. Three-dimensional visualization of the face and skull using computerized tomography and laser scanning techniques[J]. Eur J Orthod, 1987, 9(4): 247-253.
- [6] Moss JP, Grindrod SR, Linney AD, et al. A computer system for the interactive planning and prediction of maxillofacial surgery[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1988, 94(6): 469-475.
- [7] Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2002, 122(4): 342-348.
- [8] Kovacs L, Zimmermann A, Brockmann G, et al. Three-dimensional recording of the human face with a 3D laser scanner[J]. J Plast Reconstr Aesthet Surg, 2006, 59(11): 1193-1202.
- [9] 刘林, 许天民, 张益, 等. 激光扫描在面部畸形三维重建及测量中的初步应用[J]. 口腔医学, 2005, 12(6): 345-347.
Liu Lin, Xu Tianmin, Zhang Yi, et al. Initial application of laser scanning for three-dimensional reconstruction and anthropometrics of facial deformity[J]. Stomatology, 2005, 12(6): 345-347.
- [10] 龙丽华, 周洪, 潘俊君, 等. 面部软组织激光扫描三维自动测量系统的初步研究[J]. 中国美容医学, 2008, 17(5): 701-704.
Long Lihua, Zhou Hong, Pan Junjun, et al. Primary study of three-dimensional and automatic facial measuring system based on laser scanning[J]. Chin J Aesthetic Medicine, 2008, 17(5): 701-704.
- [11] Nakasima A, Terajima M, Mori N, et al. Three-dimensional computer-generated head model reconstructed from cephalograms, facial photographs, and dental cast models[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2005, 127(3): 282-292.
- [12] Noguchi N, Tsuji M, Shigematsu M, et al. An orthognathic simulation system integrating teeth, jaw and face data using 3D cephalometry[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2007, 36(7): 640-645.
- [13] Chen LH, Chen WH. Three-dimensional computer-assisted simulation combining facial skeleton with facial morphology for orthognathic surgery[J]. Int J Adult Orthodon Orthognath Surg, 1999, 14(2): 140-145.
- [14] Cavalcanti MG, Rocha SS, Vannier MW. Craniofacial measurements based on 3D-CT volume rendering: Implications for clinical applications[J]. Dentomaxillofac Radiol, 2004, 33(3): 170-176.
- [15] Swennen GR, Barth EL, Eulzer C, et al. The use of a new 3D splint and double CT scan procedure to obtain an accurate anatomic virtual augmented model of the skull[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2007, 36(2): 146-152.
- [16] 顾泽旭, 陈学鹏, 高峰, 等. 颅颌面三维可视化模型的构建及应用[J]. 实用口腔医学杂志, 2008, 24(1): 103-106.
Gu Zexu, Chen Xuepeng, Gao Feng, et al. Establishment and application of craniofacial three-dimensional visualization model[J]. J Pract Stomatol, 2008, 24(1): 103-106.

(本文编辑 汤亚玲)