

3D 打印上颌骨手术模型误差测量的实验研究*

吕俊¹, 廖媛媛², 吴坡², 徐平², 鄢兰元², 李焰², 张纲^{1△}

(1. 第三军医大学新桥医院口腔颌面外科, 重庆 400037; 2. 成都军区总医院附属口腔医院, 成都 610017)

[摘要] **目的** 分析 3D 打印上颌骨手术模型的误差, 为口腔颌面外科 3D 打印技术的应用提供基础数据支持。**方法** 应用熔纤 3D 打印技术制作标准几何模型和上颌骨模型, 观测两种模型的表面光洁度, 测量几何模型的外形数据和精细度, 测量上颌骨模型与颌骨标本骨性标志物间的距离误差。**结果** 3D 打印标准几何模型的表面 X-Z、Y-Z 平面呈水平排列, X-Y 平面呈经纬交错排列, 精度误差率在 $-1.67\% \sim 1.47\%$; 最高解析度 X 及 Y 轴边长为 0.25 mm, Z 轴边长为 0.50 mm。3D 打印上颌骨模型骨性标志点间距离的误差率在 $-0.08\% \sim 1.96\%$, X 轴向上误差率均值为 1.59%, Y 轴为 0.86%, Z 轴为 0.42%, X 轴误差率显著大于 Y、Z 轴 ($P < 0.05$)。**结论** 3D 打印技术制作上颌骨模型具有很高的精确度, 通过合理设计可以提高模型制作精度来满足临床需要。

[关键词] 误差率; 熔融沉积成型技术; 上颌骨; 骨性标志点; 模型, 解剖学

[中图分类号] R782

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2017)06-0799-03

A study on the dimensional error of 3D printing maxilla models*

Lv Jun¹, Liao Yuanyuan², Wu Po², Xu Ping², Yan Lanyuan², Li Yan², Zhang Gang^{1△}

(1. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Xinqiao Hospital of Third Military Medical University, Chongqing 400037, China; 2. Department of Stomatology, Affiliated Dental Hospital of the General Hospital of Chengdu Military Command, Chengdu, Sichuan, 610017, China)

[Abstract] **Objective** To measure the dimensional error of three dimensional printing maxilla models for the clinical application to oral and maxillofacial surgery. **Methods** The FDM 3D printing was employed to make standard geometric shape models and maxillary models. After the surface finish of both models being observed, the contour data and fineness of geometric models, as well as the distance error of bony markers between maxillary models and jaw bones specimen were measured. **Results** Within the 3D printing standard geometric model, the fiber arrange horizontally in X-Z, Y-Z surface and crosswise in X-Y surface, and the accuracy errors range from -1.67% to 1.47% . Moreover, the maximum resolution was 0.25 mm in X and Y axis, and 0.50 mm in Z axis. Within the maxillary model, the distance error of bony markers range from -0.08% to 1.96% , and the mean errors were 1.59%, 0.86%, 0.42% in X, Y and Z axis respectively. The mean error in X axis was significantly larger than that in Y or Z axis ($P < 0.05$). **Conclusion** 3D printing maxilla models may possess high accuracy and apply to clinical practice.

[Key words] error rate; fused deposition modeling; maxilla; bony marker; models, anatomy

3D 打印技术(three dimensional printing, 3D Printing)是一种以数字模型为基础, 运用高分子或金属材料按照计算机所设计的三维数字模型, 通过逐层打印的方式来制造三维物体的技术^[1-2]。该技术基于患者的 CT 及 MRI 的数字影像, 转化为医学影像通信标准(DICOM)数据, 计算机建模实施打印, 可以完成个性化的骨骼模型、护具、手术导板及相关医疗用品的制作^[3]。该技术目前已广泛应用在医学领域, 尤其是在头面部外伤治疗中取得了良好的辅助治疗效果^[4-5]。国外基础研究发现, 在制作动物骨骼标本时 3D 打印技术因不同的打印机类型会出现不同的模型误差^[6], 但是在国内针对临床应用的 3D 打印模型的精确性和安全性评估尚未有研究报道。因此, 本研究使用国产 3D 打印机, 应用较为成熟的熔融沉积成型技术(fused deposition modeling, FDM)制作标准几何模型和人体上颌骨模型; 进而观察模型表面和测量模型几何数据, 以评价分

析 3D 打印模型的误差; 并通过改良模型设计来减小误差, 提高模型精度。

1 资料与方法

1.1 实验材料 本实验使用 SolidWork2014 (Dassault Systemes, 法国)设计标准几何模型。上颌骨数据来源于成都军区总医院附属口腔医院和第三军医大学新桥医院口腔颌面外科上颌骨标本, 锥形束 CT (CBCT) 数据扫描 (KAVA, 美国); MIMICS17.0 软件 (Materialise, 美国) 完成上颌骨重建。KISSlicer 切片软件设计打印。FDM35-3525 3D 打印机 (立体易, 广州) 制作模型。工业显微镜 (Olympus BX53, 日本) 拍照, 游标卡尺和千分尺 (Mitutoyo, 日本) 测量。

1.2 模型制作方法

1.2.1 标准几何模型设计 使用 SolidWork2014 软件设计 30 mm × 30 mm × 30 mm 标准立方体, 设计 X、Y、Z 3 个方向边长

* 基金项目: 军队医学科技青年培育计划 (15QN034); 第三军医大学新桥医院临床科研课题 (2014YLC31)。作者简介: 吕俊 (1986-), 主治医师, 硕士, 主要从事口腔颌面外科、牙周病及口腔循证医学研究。△ 通信作者, E-mail: xqyykqk@163.com。

分别为 4.0、2.0、1.0、0.5、0.25、0.125 mm, 长度为 20 mm 的长方体, 以 .stl 文件格式保存。

1.2.2 上颌骨模型设计 使用 CBCT 扫描人体上颌骨标本, 层厚为 0.20 mm, 利用 MIMICS 17.0 软件完成上颌骨重建, 灰窗值选择 200~300, 模型均以 .stl 文件格式保存。

1.2.3 模型打印和参数设定 使用 KISSlicer 切片软件设计打印, 模型表面厚度 1.00 mm, 层厚 0.25 mm, 支撑设计 70°, X、Y 轴向移动速度 100 mm/s, Z 轴向移动速度 3.5 mm/s。FDM35-3525 打印机完成模型打印, 熔纤温度 210°, 颌骨矢向与打印机 X 轴对齐。

1.3 打印精度检测 标准几何模型制作完成后, 置于工业显微镜下对模型 X-Z 和 X-Y 面在 20 倍下观察拍照; 游标卡尺测量立方体 X、Y、Z 3 个轴向长度, 测量 5 次, 求均值并与设计值比较。上颌骨模型制作完成后, 按照骨骼的横向、矢向和纵向分组。横向测量: 眶上孔两点(取内点), 眶下孔两点(取内点), 茎突末点两点, 双侧颧弓最低点之间的直线距离; 矢向测量: 切牙孔到枕外隆突凸点, 切牙隆起到腭骨突起点, 左右颧骨低点到茎突, 颅骨前后径直线距离; 纵向测量: 左右眶上下孔间距离, 鼻骨上末点到切牙牙槽突, 梨状孔上下骨缘直线距离。每两点距离测量 4 次。3D 打印模型和颅骨标本同时测量, 求均值进行统计学分析。

1.4 统计学处理 采用 SPSS10.0 软件进行数据分析, 计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 比较采用 *t* 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 标准几何模型表面光滑度和解析度 在 3D 打印标准几何模型的 X-Z 平面, 可见打印纤维呈与 Z 方向垂直的水平排列, 其纤维直径为 0.010~0.015 mm; 在 X-Y 平面, 打印纤维呈经纬交错, 纤维直径为 0.01~0.02 mm。从解析度模型可以

看出, 在 X、Y 方向 3D 打印机可以打印出 0.25 mm 边长的立方体, 而在 Z 轴方向, 打印机在打印 0.50 mm 边长立方体的时候, 已经与下一个 0.25 mm 融合, 见图 1。



图 1 A: X-Z 平面熔纤打印平面; B: X-Y 平面熔纤打印平面; C: 解析度模型外形。

图 1 标准几何模型表面光滑度和解析度

2.2 打印误差

2.2.1 标准几何模型误差 利用 SolidWorks 所建立的 30 mm² 的立方体, 模型与设计误差率均值($n=4$)分别为: X 轴向 -1.67%, Y 轴向 -1.30%, Z 轴向 1.47%。

2.2.2 上颌骨模型误差 3D 打印上颌骨模型能够如实反映颌骨标本的解剖结构形态, 所选取的解剖标志点均清晰可见(图 2)。上颌骨、颧弓及眶区的侧壁模型表面光滑, 颅底、上腭和眶上下板等水平位结构边面粗糙。按照所选取的解剖结构点测量得出数据表 1, 上颌骨骨骼标本和 3D 打印上颌骨模型骨性标志点间的误差率在 -0.08%~1.96%, 经统计学分析, 各个测量点之间差异无统计学意义($P > 0.05, n=4$)。

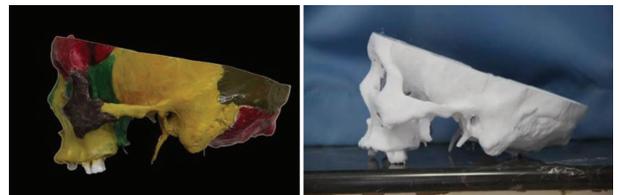


图 2 A: 上颌骨骨骼标本; B: 3D 打印上颌骨模型。

图 2 上颌骨骨骼标本与 3D 打印上颌骨模型对比

表 1 3D 打印上颌骨模型与上颌骨骨骼标本之间的误差 (cm, $n=4$)

方向	标志点	3D 打印模型平均值 1	上颌骨骨骼标本平均值 2	误差	误差率 (%)	
横向	眶上孔两点之间(取内点)	5.072 5	4.982 5	0.090 0	1.81	
	眶下孔两点之间(取内点)	5.429 0	5.324 5	0.104 5	1.96	
	茎突末点两点之间	5.895 5	5.792 5	0.013 0	0.22	
	双侧颧弓最低点	9.625 0	9.547 0	0.078 0	0.82	
矢向	切牙孔到枕外隆突凸点	16.011 5	16.157 5	-0.146	-0.90	
	切牙隆起到腭骨突起点	4.650 5	4.588 0	0.062 5	1.36	
	颧骨低点到茎突	左侧	6.027 5	5.973 0	0.054 5	0.91
	右侧	5.972 0	6.013 5	-0.041 5	-0.69	
	颅骨前后径直线距离	19.114 5	19.035 0	0.079 5	0.42	
纵向	眶上下孔间距离	左侧	4.554 5	4.516 5	0.038 0	0.84
	右侧	4.622 0	4.625 5	-0.003 5	-0.08	
	鼻骨上末点到切牙牙槽突	5.229 5	5.219 0	0.010 5	0.20	
	梨状孔上下骨缘直线距离	2.813 5	2.789 5	0.024 0	0.86	

2.3 打印误差轴向分析 按照上颌骨骨性标志点测量线的方向, 进行颌骨 X、Y、Z 3 个方向分类求均值, 统计打印误差率, 结果显示模型 X 轴向上的误差率均值为 1.59% ($n=4$), Y 轴

向上为 0.86% ($n=5$), Z 轴向上为 0.42% ($n=4$), 见图 3。经 *t* 检验统计分析, Z 轴向上的误差率显著低于 X 轴向 ($P < 0.01$), Y 轴向上的误差低于 X 轴向 ($P < 0.05$)。

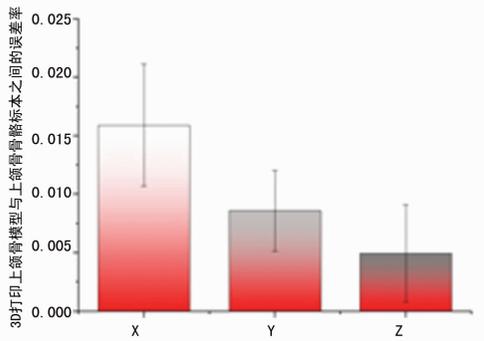


图3 3D打印上颌骨模型在 X、Y、Z 轴向上的误差率统计对比

3 讨论

近年来利用 3D 打印技术辅助外科手术治疗得到越来越多医生的认同,随着手术模型和导板的应用,在口腔颌面部创伤、肿瘤及整形方面取得了良好的治疗效果^[7]。在创伤方面,颌骨骨折模型及虚拟手术模型可为临床医生解决了骨折解剖复位的难题^[8];在肿瘤方面,羊书勇等^[9]应用 3D 打印技术在上颌骨肿瘤扩大切除后,结合游离皮瓣的应用完成上颌骨缺损的修复,在患者术后的功能恢复和外观面型上均取得了良好的修复效果。但是,国内应用 3D 打印辅助颌面外科手术治疗是否存在形态误差,以及怎样制作颌骨模型才能有效避免以上误差,尚无相关的实验研究。

国外在 3D 打印技术医学应用方面较早地注意到了打印误差对模型的影响。Doney 等^[6]使用 ProJet HD 300、Shapeways Inc. 和 Makerbot Replicator 3 款国外 3D 打印机,通过 CT 数据完成了兔子的骨骼及肺部的打印,发现存在不同的系统误差,尤其是 Makerbot Replicator 打印机。Kasparova 等^[10]在研究利用 3D 打印技术制作口腔义齿模型中也发现,RepRap 打印机在牙列打印过程中存在系统误差,会给口腔临床工作带来手术精准度、修复体精确度不够等问题。本研究发现 FDM35-3525 打印机制作上颌骨模型的系统误差为 $-0.08\% \sim 1.96\%$,虽然高于 ProJet HD 300 等工业级光敏树脂打印机,但是它比国外 Makerbot Replicator 等桌面级打印机的系统误差要低。相对于颌面外科手术临床应用要求,这一精确度符合制作 3D 打印手术模型、植入体的预成型及设计手术方案的需要。然而在手术导板的制作上,实验中 FDM35-3525 打印机的模型表面纤维仅仅只能达到 0.1 mm,其解析度在 0.25~0.50 mm,无法在精确度上满足要求。同样在牙列制作,或是咬合导板的制作中,FDM35-3525 打印机同样也存在误差过大和精确度不够的问题。

采用 3D 打印颌骨模型不仅广泛应用于颌骨肿瘤、创伤、整形手术的模型制备,而且在术前对修复颌骨缺损的植入体的预成型、设计手术截骨方案等方面发挥着重要作用^[11-12]。随着 3D 打印机的发展,目前的模型制作在精度上有了长足的进步。早在 2008 年 Daniela 等通过 3D 打印机制作颅骨模型,其测量的几何误差尚在 2.10%~2.67%,高于本实验所检测到的误差^[13]。Murugesan 等^[14]发现用 FDM 3D 打印机的下颌骨模型其几何误差率为 1.73%;而 Maschio 等^[15]发现 FDM 3D 打印技术的下颌骨模型其几何误差率达到 3.76%;Petropolis 等^[16]采用 FDM3D 打印打印面骨标本,层高为 0.1 mm、

0.25 mm、0.5 mm 的模型的几何误差率分别为 0.44%、0.52%、1.1%。目前,3D 模型打印误差主要来源于数据录入和数据输出的误差,数据录入误差为 CT 数据扫描和数据建模过程中产生,这里不是本实验讨论的重点。数据输出的误差是由 FDM 打印机本身的机械运动和参数设计所决定。实验中通过对 X、Y、Z 3 个方向的数据统计,发现模型 X 轴向上误差率显著大于 Y 和 Z 方向,这是由于打印机布景仪在模型 X 轴运动负载高于 Y 方向,同步电机定位性下降所引起。而 Z 方向模型误差最小,是由于 Z 向为螺旋轴定位,运动缓慢所决定的。实验过程中同时观察到几何模型的 X-Z 和 Y-Z 面相对光洁度好于 X-Y 平面,在上颌骨模型中也是侧面好于水平面,因此在模型打印之前有必要结合临床需要设计好打印方向。以上颌骨为例,考虑到模型支架的问题,我们通常是将颌骨的矢向与打印机 Y 轴重合,将颅底面放置于打印机底盘来完成模型打印,这是在有限的打印条件下可以显著减少误差的最简便方法。

本实验研究对 3D 打印上颌骨模型的精准性完成了初步探索,采用 FDM 3D 打印技术制作的上颌骨 3D 打印模型中存在一定的几何结构误差,但此误差相对于手术模型外科和植入体预成型是能够接受的。在利用 FDM 3D 打印技术制作手术模型的过程中,按照临床需要巧妙设计模型打印方向,能够提高模型解析度、光洁度,并降低特定方向上的误差率,从而提高模型的精确度。今后 3D 打印技术将会在植入体的制造、组织工程研究中拥有更大的应用空间^[17-18],对于打印模型在临床应用中的安全性、精准性研究也应当进一步深入下去,为其应用提供更多的基础理论保障。

参考文献

- [1] 胡敏,谭新颖,鄢荣曾,等. 3D 打印技术在口腔颌面外科领域中的应用进展[J]. 中国实用口腔科杂志, 2014, 7(6): 335-339.
- [2] Huang WB, Zhang XL. 3D printing: print the future of ophthalmology[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2014, 55(8): 5380-5381.
- [3] Kim JH, Kim KB, Kim WC, et al. Accuracy and precision of polyurethane dental arch models fabricated using a three-dimensional subtractive rapid prototyping method with an intraoral scanning technique[J]. Korean J Orthod, 2014, 44(2): 69-76.
- [4] Waran V, Menon R, Pancharatnam D, et al. The creation and verification of cranial models using three-dimensional rapid prototyping technology in field of transnasal sphenoid endoscopy[J]. Am J Rhinol Allergy, 2012, 26(5): E132-136.
- [5] Waran V, Devaraj P, Chandran TH, et al. Three-dimensional anatomical accuracy of cranial models created by rapid prototyping techniques validated using a neuronavigation station[J]. J Clin Neurosci, 2012, 19(4): 574-577.
- [6] Doney E, Krumdick LA, Diener JM, et al. 3D printing of preclinical X-ray computed tomographic data Sets[J]. J Vis Exp, 2013(73): e50250.
- [7] Murphy RJ, Basafa E, Hashemi S, et al. (下转第 804 页)

主的工作,而受教育程度低的人从事体力劳动的可能性更大。体力劳动者生活环境相比脑力劳动者差,劳动强度大时机体更容易出现疲劳、受伤等情况。此时可能会改变机体对外界的免疫能力,导致对某些致病因素的易感性增强,或原有的免疫功能紊乱加剧,诱发 RA。本研究因为样本问题和经济因素未研究饮食因素对 RA 患病的影响。对于饮酒对 RA 的影响作用,不同的作者观点也不一致,本文中 RA 患病人群多为老年女性,故未对饮酒因素作进一步比较分析。

综上所述,漯河地区中老年人 RA 患病形势严峻,总体患病率为 0.71%,女性、居住一层、吸烟和遗传因素是 RA 的危险因素。为 RA 的防治提供了数据支持。

参考文献

- [1] Aletaha D, Neogi T, Silman AJ, et al. 2010 Rheumatoid arthritis classification criteria: an American College of Rheumatology/European League Against Rheumatism collaborative initiative[J]. *Arthritis Rheum*, 2010, 62(9): 2569-2581.
- [2] 张凤山,任璐雪.我国北方高寒林区风湿病的流行病学调查[J]. *哈尔滨医科大学学报*, 1991, 25(1): 25-27.
- [3] 叶冬青,李向培.安徽淮南潘集区类风湿性关节炎流行病学调查[J]. *安徽医科大学学报*, 1993; 28(1): 34-36.
- [4] 臧长海,曾庆余,李小峰,等.太原地区常见风湿病流行病学研究[J]. *中国药物与临床*, 2007, 7(8): 597-602.
- [5] Chen SL, Xiue BQ, Bao CD, et al. COPCORD study in

Shanghai APLA[J]. *Rheumatology*, 1991, 18(Suppl): 10.

- [6] Sebbag M, Chapuy Regaud S, Auger I, et al. Clinical and pathophysiological significance of the autoimmune response to citrullinated proteins in rheumatoid arthritis [J]. *Joint Bone Spine*, 2004, 71(6): 493-502.
- [7] 叶剑荣,袁利群.抗 CCP 抗体和 RF 对类风湿性关节炎患者诊断价值的比较[J]. *湖南师范大学学报(医学版)*, 2009, 6(4): 37-40.
- [8] Criswell LA, Merlino LA, Cerhan JR, et al. Cigarette smoking and the risk of rheumatoid arthritis among postmenopausal women: results from the Iowa women's health study[J]. *Am J Med*, 2002, 112(6): 465-471.
- [9] Hutchinson D, Shepstone L, Moots R, et al. Heavy cigarette smoking is strongly associated with rheumatoid arthritis (RA), particularly in patients without a family history of RA[J]. *Ann Rheum Dis*, 2001, 60(3): 223-227.
- [10] Uhlig T, Hagen KB, Kvien TK. Current tobacco smoking, formal education, and the risk of rheumatoid arthritis [J]. *J Rheumatol*, 1999, 26(1): 47-54.
- [11] Harrison BJ, Silman AJ, Wiles NJ, et al. The association of cigarette smoking with disease outcome in patients with early inflammatory polyarthritis [J]. *Arthritis Rheum*, 2001, 44(2): 323-330.

(收稿日期:2016-10-18 修回日期:2016-11-26)

(上接第 801 页)

Optimizing hybrid occlusion in Face-Jaw-Teeth transplantation: a preliminary assessment of Real-Time cephalometry as part of the computer-assisted planning and execution workstation for craniomaxillofacial surgery[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2015, 136(2): 350-362.

- [8] Ernout C, Bouletreau P, Meyer C, et al. Reconstruction assisted by 3D printing in maxillofacial surgery[J]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale*, 2015, 116(2): 95-102.
- [9] 羊书勇,郑维银,李晨军,等.3D 打印个性化钛网结合游离皮瓣修复上颌缺损的探索[J]. *西南国防医药*, 2014, 24(10): 1052-1055.
- [10] Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, et al. Possibility of Reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models[J]. *Biomed Eng Online*, 2013, 12(1): 49.
- [11] Cohen A, Laviv A, Berman P, et al. Mandibular Reconstruction using stereolithographic 3-dimensional printing modeling technology[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2009, 108(5): 661-666.
- [12] Dziegielewski PT, Zhu J, King B, et al. Three-Dimensional biomodeling in complex mandibular Reconstruction and surgical simulation: prospective trial [J]. *J Otolaryngol Head Neck Surg*, 2011, 40(1): S70-81.

- [13] Silva DN, De Oliveira MG, Meurer E, et al. Dimensional error in selective laser sintering and 3D-printing of models for craniomaxillary anatomy Reconstruction [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2008, 36(8): 443-449.
- [14] Maschio F, Pandya M, Olszewski R. Experimental validation of plastic mandible models produced by a "Low-Cost" 3-dimensional fused deposition modeling printer [J]. *Med Sci Monit*, 2016, 22: 943-957.
- [15] Murugesan K, Anandapandian PA, Sharma SK, et al. Comparative evaluation of dimension and surface detail accuracy of models produced by three different rapid prototype techniques[J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2012, 12(1): 16-20.
- [16] Petropolis C, Kozan D, Sigurdson L. Accuracy of medical models made by consumer-grade fused deposition modeling printers[J]. *Plast Surg (Oakv)*, 2015, 23(2): 91-94.
- [17] 黄俊辉,刘桂,姚志刚,等.3D 打印技术在口腔颌面修复中的应用[J/CD]. *中华口腔医学研究杂志(电子版)* 2015, 9(3): 252-255.
- [18] Wu GH, Hsu SH. Review: Polymeric-Based 3D printing for tissue engineering[J]. *J Med Biol Eng*, 2015, 35(3): 285-292.

(收稿日期:2016-10-23 修回日期:2016-11-21)