

三维打印牙颌模型的计算机辅助测量与精确度研究

陈一炜, 朱建明

(中国计量大学 信息工程学院 生物医学工程研究所, 杭州 310018)

摘要: 牙颌模型是口腔正畸治疗的重要参考标准, 传统的石膏模型易老化断裂, 且存储不便; 针对石膏模型制作过程效率较低、精度不高, 提出了基于 3D 打印技术制作牙颌模型的实际方法, 并应用计算机辅助测量, 进行了模型精确度分析; 首先通过将影像数据数字化建模, 采用熔融沉积制造技术得到 3D 打印牙颌模型; 其次制定模型精确度分析的测量项目与测量标准, 利用计算机辅助测量与三维最佳拟合配准技术, 分析模型精确度; 最后对测量数据统计分析, 并得到差异分布规律; 实验结果表明, 3D 打印牙颌模型精确度完全能够满足临床需求, 3D 打印相较于传统的制作过程更高效和经济, 计算机辅助的牙颌模型测量不但替代了传统的手工测量方式, 也大大提高了测量的准确性与可重复性, 具有很高的推广价值。

关键词: 计算机辅助; 牙颌模型测量; 精确度; 三维打印技术

Research of Computer-aided Measurement and Accuracy of 3D Printing Dental Casts

Chen Yiwei, Zhu Jianming

(Department of Biomedical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Dental casts have been used as a reference standard in orthodontic treatment, however, these traditional plaster casts are subject to degradation, fracture and storage inconvenience. Aiming at the low efficiency and low precision of the plaster casts making process, a practical method of making the dental casts based on 3D printing technology is put forward, and the accuracy of the casts is analyzed by computer-aided measurement. Firstly, the 3D printing dental casts is obtained by fused deposition modeling technique after building digital model of image data. Then the measurement items and measurement standards of accuracy analysis are developed, at the same time, the accuracy of the casts is analyzed using computer-aided measurement and best-fit algorithm. Finally statistical analysis is used to the measurement data and shows the difference distribution. Experimental results show that 3D printing dental casts have clinically acceptable accuracy, and 3D printing technology is more efficient and economical than the traditional production process. The computer aided measurement of dental casts not only replaces the traditional manual measurement method, but also greatly improves the accuracy and efficiency of the measurement, which has the potential to be applied for clinical practice.

Keywords: computer-aided; dental casts measurement; accuracy; 3D printing technique

0 引言

牙科正畸工作中, 牙颌模型是记录口腔信息和制定治疗计划的重要参考资料, 传统牙颌模型主要通过进入口腔制取印模再灌注石膏的方法制作。传统入口式取模易引起恶心等不适症状, 特别是大部分低龄的患者配合度较低; 而且石膏牙颌模型本身重量较大、存储困难, 已不能很好地适应当今数字化医疗的趋势。Kasparova M 等人使用激光三维扫描仪对石膏模型进行扫描得到口腔数字化信息^[1], 虽然通过扫描构建的数字化模型具有良好的精确度, 但其仍需要这个类似“侵入式”的步骤来制作传统石膏模型。Zhang F 等人和 De W O 等人通过口内扫描仪或 CBCT 设备得到口腔内的信息, 再采用三维逆向软件重建出数字化牙颌模型, 利用这些非接触式的光学检查方法实现数字化模型的构建^[2-3], 然而, 类似石膏模型的实体化牙颌模型才更符合医生操作习惯。

本文综合上述思路, 尝试利用成熟的熔融沉积 3D 打印技术制作个性化、定制化^[4]的牙颌实体模型, 探索出一种基于患者 CBCT 影像数据以及熔融沉积 3D 打印技术构建数字化模型并完成牙颌实体模型制作的方法。利用光学扫描技术获取牙颌断层图像, 三维重建后得到数字化模型, 再通过计算机辅助设计技术, 设计出实体模型, 采用熔融沉积 3D 打印技术得到实体化牙颌模型。同时, 区别于常规的线性测量技术^[5], 制定出一套用于牙颌模型精确度评价的测量项目和测量标准, 利用计算机辅助测量和三维最佳拟合配准技术, 对比分析了 3D 打印实体模型与标准模型的差异, 体现出两种模型具体的三维偏差。本方法通过医学影像与 3D 打印相结合制作牙颌实体模型, 很好地避免患者的不适感。同时制定牙颌模型精确度评价的测量项目与测量标准, 还将计算机辅助测量手段引入模型差异的检验, 代替常规测量手段, 无需损伤模型, 即可得到三维差异分布规律。

本实验所得实际误差结果能够满足临床的精度需求, 为改良传统牙颌模型制作提供了新的思路, 表明熔融沉积 3D 打印技术在口腔医学临床中具有良好的应用前景。

1 基于三维打印制作牙颌模型

牙颌模型的制作主要基于 CBCT 影像数据, 应用计算机断

收稿日期:2017-08-14; 修回日期:2017-09-08。

作者简介: 陈一炜(1992-), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事计算机应用技术、医学物理方向的研究。

通讯作者: 朱建明(1963-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事医学影像、放疗物理方向的研究。

层处理技术, 采用计算机辅助建模方法, 将建模后的数据导入熔融沉积 3D 打印机中得到上下颌实体牙颌模型。

1.1 影像数据获取

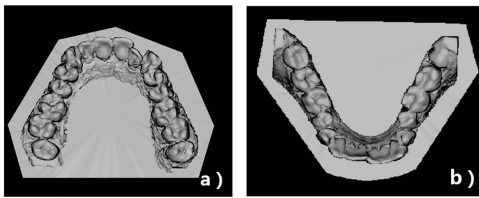
选取拟做正畸治疗的志愿者, 入选标准为: 无乳牙滞留、无充填体以及无口内修复体。志愿者进行口腔清洁后, 对其行 CBCT (cone beam computed tomography, CBCT, Instrumentarium Dental 公司, 芬兰) 扫描检查, 将影像数据以 DICOM 格式刻入光盘。CBCT 扫描参数为层厚 0.3 mm、管电压 90kVp、球管电流 10 mA、暴露时间 10.8 s。同时采用传统方法制取石膏模型, 作为标准模型。

1.2 牙颌模型制作

采用计算机软件对志愿者上下颌扫描的影像数据数字化建模, 主要采用 Mimics 17.0 软件 (Materialise 公司, 比利时)。

1.2.1 数字化模型制作

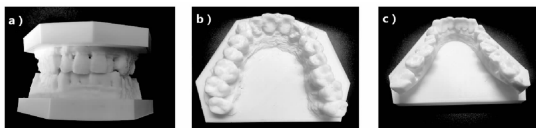
首先, 将光盘上所采集的 CBCT 数据导入 Mimics 软件中, 由于 CBCT 数据符合 DICOM 格式, 图像按顺序自动打开, 手动设置视图方向。然后, 由于 Mimics 软件根据 CT 值来区分不同的组织, CT 值越高, 其阈值越高^[6], 通过设置阈值区间来得到需要的部分。使用 Thresholding 命令分离牙颌组织, 再执行 Region growing 命令, 分别获得初步重建的上下颌模型。但是通过阈值拾取的牙颌模型是由三角片组成的面网格模型, 表面比较粗糙, 存在突起和尖刺。需要利用 Mimics 17.0 软件自带的 3-matic 软件, 通过 Smooth、Reduce、Reduce Triangles 等命令, 修复模型并获得良好表面。最后, 按牙颌模型的修剪规则, 直接使用 CAD 模块制作上下基板, 再与上下颌模型保证合适的配合关系。添加基板的全口牙列数字化模型如图 1 所示。



(a) 上颌 (b) 下颌
图 1 添加基板的全口牙列数字化模型

1.2.2 三维打印实体模型制作

将数字化模型的三维数据转化为 STL 格式保存, 将 STL 数据导入 EinStart-S 型 3D 打印机 (杭州先临三维科技公司, 中国) 的配套软件进行切片处理, 得到打印路径。通过 3D 打印设备, 应用熔融沉积 3D 打印技术制作上下颌牙颌模型实体。模型制作材料为聚乳酸 (PLA), 打印厚度为 0.1 mm。3D 打印实体模型如图 2 所示。



(a) 牙颌模型的咬合关系 (b) 上颌模型 (c) 下颌模型
图 2 应用熔融沉积 3D 打印机制作的牙颌模型

2 牙颌模型测量与配准方法

在牙颌模型的精确度比较中, 传统石膏模型测量的起点的定位完全依靠肉眼判断, 易受模型表面缺陷、光照角度、观测角度、参考平面、牙尖交错等影响, 难于精确定位。特别是相邻牙的接触点同时偏离正常位置时, 更加难于准确测量^[7]。

所以对于牙颌模型需要采用更高准确性和可重复性的计算机辅助测量方法。

2.1 测量方法

利用影像数据得到的 3D 打印模型相较于传统的石膏模型, 在测量时可以很直接地利用计算机辅助测量, 这为后续两种模型精确度分析提供了准确的测量数据。

2.1.1 测量项目制定

模型的测量项目具体包括:

1) 恒牙牙冠宽度:

上下颌每颗恒牙近远中最尖点的距离 (W11—W18、W21—W28、W31—W38、W41—W48), 无法测量的阻生智齿除外。

牙冠宽度用以计算前牙和全牙 Bolton 指数, Bolton 指数可以诊断患者上、下牙弓是否存在牙冠宽度不协调;

2) 尖牙牙冠高度:

上下颌尖牙唇侧龈缘最凹点到牙尖点的距离 (H13、H23、H33、H43)。

尖牙位于口角转折处, 其牙周情况比较具有代表性;

3) 牙弓宽度:

①牙弓前段宽度: 左右侧尖牙牙尖或牙尖磨耗面中点的距离 (D13—23、D33—43)。

②牙弓中段宽度: 左右侧第一前磨牙近中窝点的距离 (D14—24、D34—44)。

③牙弓后段宽度: 左右侧第一磨牙中央窝点的距离 (D16—26、D36—46)。

牙弓宽度协调与否关系到是否需要拔牙、扩弓, 甚至辅以至颌手术;

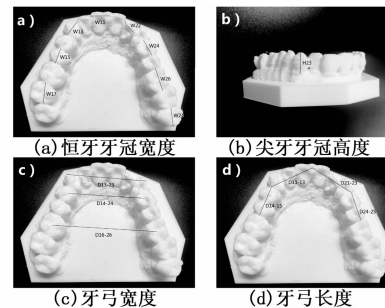
4) 牙弓长度:

①牙弓前段长度: 同侧中切牙近中接触点和尖牙远中接触点的距离 (D11—13、D21—23、D31—33、D41—43)。

②牙弓中段长度: 同侧第一前磨牙近中接触点和第二前磨牙远中接触点的距离 (D14—15、D24—25、D34—35、D44—45)。

牙弓长度用以计算牙弓应有长度 (第一磨牙前牙弓内各牙冠宽度总和)、牙弓现有长度 (牙弓前段和中段长度总和), 得到拥挤度 (牙弓应有和现有长度之差), 牙弓拥挤度是矫治计划设计中拔牙与非拔牙的重要依据。

如图 3 为测量项目示意图。



(a) 恒牙牙冠宽度 (b) 尖牙牙冠高度
(c) 牙弓宽度 (d) 牙弓长度
图 3 测量项目示意图

2.1.2 计算机辅助测量

由于测量项目主要是牙冠和牙弓的长度与宽度, 属于直线距离的测量, 所以测量项目起止位置的选择对结果的准确性具有直接地影响。起止位置的确定方法也直接影响到所制定的测量项目是否具有有良好的可重复性。常规测量方法主要以两颗对

侧的牙齿牙尖确定的平面来作为参考平面，显然该平面会随着实验人员观测角度的不同而发生很大的变化。特别是牙齿接触点同时偏离时，测量的牙尖与作为参考平面的牙尖并不在同一直线上，是很难得到准确的测量值。而且常规测量方法主要是使用手持式数字卡尺，由同一位实验人员对牙颌模型进行多次相同的线性测量，舍去异常的测量值后，采用多次重复测量的平均值作为测量值^[8]。虽然进行多次的测量，但仍无法改变测量起止位置的准确性，导致测量值误差较大。

计算机辅助测量通过选择每个顶点来保证起止位置的准确性，利用顶点线面的垂直空间关系，在起止位置显示出一个垂直于该点所在平面的圆锥体，保证牙体表面与该点所在平面的垂直关系，即可准确确定起止位置。通过计算机辅助测量精确定位选择每个顶点，得到相应起止位置的解剖标志，如最突点、最凹点和牙尖点等，由此得到测量距离具有很高的精确性和良好的可重复性。且对于一些由于牙齿畸形而产生的牙尖交错和视觉角度的局限，常规测量方法测量难度较大，至于一些隐藏牙龈组织中的阻生牙，更是无法发现。而通过计算机辅助测量，可以更加直观清楚地发现异常的牙齿排列，更加方便准确地测量出错位牙偏离正常位置的距离。

在获得上下颌模型后，进行计算机辅助测量，应用计算机软件 Mimics 测量，如图 4 所示，为防止 3D 打印可能出现的误差，同时用常规测量方法的数显游标卡尺（精度 0.01 mm）对模型进行测量，并记录各项测量值并制表。采用 Prism6.0 统计软件（Graphpad 公司，美国）对上述测量值进行统计学分析，对传统石膏模型和熔融沉积 3D 打印模型的比较使用配对 *t* 检验，若 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

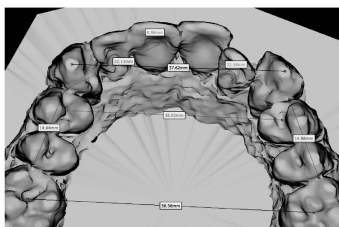


图 4 应用计算机软件辅助测量模型示意图

2.2 配准方法

传统石膏模型和熔融沉积 3D 打印模型分别使用 EinStart-S 型 3D 扫描仪（杭州先临三维科技公司，中国）进行扫描，扫描精度为 0.1 mm，得到数字化模型。本实验设定传统石膏模型为参考模型，故没有采用口内扫描仪，仅选用一台结构光三维扫描仪对两种模型进行 3D 扫描，但哪种扫描方式更准确，目前还没有确定结论，仍需进一步研究。通过扫描得到两种数字化模型分别导入 GeomagicQualify2013 软件（Geomagic 公司，美国），从舌侧分别依次连接牙龈边缘，去除此连线以下的部分，对剩余部分进行数字化配准。

采用计算机辅助最佳拟合配准技术，设定传统石膏模型为参考模型，熔融沉积 3D 打印模型为测试模型，与参考模型做最佳拟合配准。配准结果可以显示通过 CBCT 影像数据构建的数字化模型经熔融沉积 3D 打印制作的实体模型的数字化模型与传统石膏模型 3D 扫描重建的数字化模型的在牙列部分的三维差异。每次配准的结果以两个图形间误差的均方根（root mean square, RMS）形式自动输出，均方根误差计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

式中， $X_{obs,i} - X_{model,i}$ 为配准过程中两种模型对应点对之间欧氏距离最近的距离， n 为测量的点对总数，均方根误差能够很好地反映出参考模型的精确度。

两种模型对应点之间的距离越大，即在该处的差异越大，可以通过配准差异分布图上不同的颜色显示出差异的大小。再利用配准结果，分别计算出熔融沉积 3D 打印模型相对于传统石膏模型的均方根（RMS）误差均值、标准差（SD）和 95% 置信区间（CI），并根据误差分布彩图观察分析差异分布规律。

3 结果与分析

通过对每个特征测量三次并求平均值作为结果记录测量值，将测量数据录入 Prism6.0 中，绘制散点图，如图 5 所示，进行配对 *t* 检验分析，结果如表 1 所示。

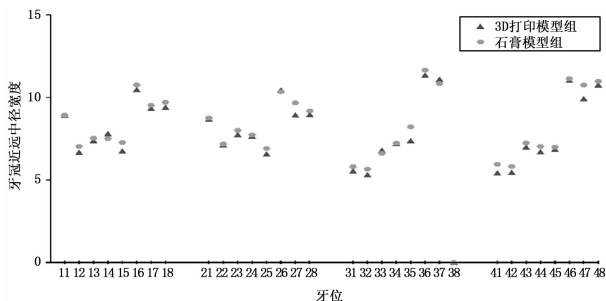


图 5 牙冠情况测量数据散点图

表 1 配对 *t* 检验结果统计表

	P 值	是否具有统计差异	对数	误差均值	误差标准差	误差协方差	95% 置信区间	
							上界	下界
							上颌	0.0027
下颌	0.0003	是	24	-0.2746	0.3170	0.06470	-0.4084	-0.1407

表 2 熔融沉积 3D 打印模型与石膏参考模型的配准偏差统计表

	误差均方根均值 (RMSE)	标准差 (SD)	95% 置信区间 (CI)		平均三维偏差 (+/-)
			上界	下界	
			上颌	0.8818	
下颌	0.8287	0.6509	0.5238	1.1336	0.7082/-0.3752

通过 3D 扫描获得的模型数据集经 GeomagicQualify2013 得到配准偏差统计，如表 2 所示，以及测试模型与参考模型配准差异的分布图，如图 6 和图 7 所示。

获得的 3D 打印牙颌模型的数据集之间的误差均方根均值 (RMSE) 受实验各个过程的累计影响，两种模型数据集具有显著性差异 ($P = 0.000$)。

3D 打印模型与石膏参考模型叠加数据集的三维偏差色温图分析显示两者存在水平和垂直两个平面的偏差。3D 打印模型上颌数据集偏差表现在切牙（门牙）和尖牙区域的水平扩张，而下颌数据集偏差表现在第二前磨牙至第三磨牙区域的垂直变形和水平收缩。3D 打印模型与石膏参考模型叠加数据集的三维偏差如图 8 所示，图中箭头表示失真方向，图 8 (a)

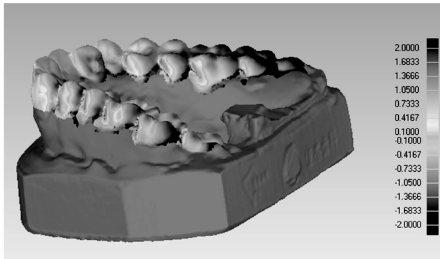


图6 3D打印模型与石膏参考模型的上牙列配准偏差分布

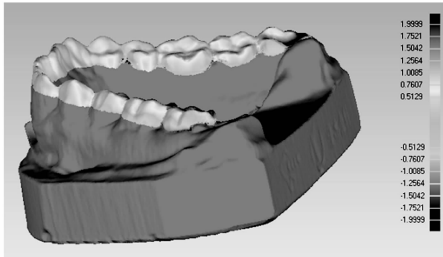


图7 3D打印模型与石膏参考模型的下牙列配准偏差分布

为上牙列, 图8(b)为下牙列。

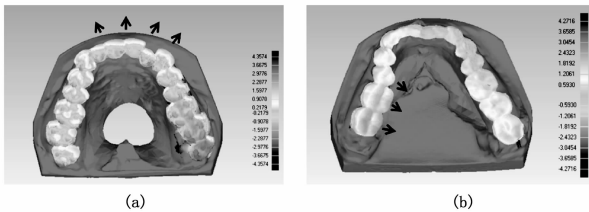


图8 3D打印模型与石膏参考模型叠加数据集的三维偏差色温图

本实验结果表明, 3D打印牙颌模型和传统石膏模型的恒牙宽度、尖牙高度、牙弓长度和宽度四项特征的测量数据虽然具有统计学差异, 上下颌差异均值分别为0.216 0 mm和0.274 6 mm。但是, Luu等^[9]指出, 口腔正畸临床上可以接受的范围为小于0.5 mm, 因此可以认为两种模型上下颌差异均值无临床意义, 在可接受的范围以内。差异值除了包含模型之间确实存在的差异, 也同时包括了在模型测量、实体模型3D扫描数字化过程和数字化模型配准过程造成的误差。同时在熔融沉积3D打印制造成形工艺过程中, 影响成形件精度的主要因素有^[10-11]: 计算机辅助设计的离散化过程、喷丝材料的性能、喷涂过程中喷丝宽度误差以及温度(喷嘴的温度和成形室的温度)、挤出速度和填充速度、分层厚度及分层方向等。其中, 熔融沉积3D打印受到打印材料本身限制, 打印层厚需要材料熔点支持, 因此材料性能也是影响3D打印模型精确度的因素之一。目前通过改进配准的方式可以得到配准过程的误差, 其他误差还无法完全分离出来。所以, 排除这些非两种模型之间确实存在的误差, 实际误差结果完全能够满足临床的精度需求。

传统的牙颌模型精确度分析通常采用二维测量方法, 主观性较大, 无法准确比较。本实验还将计算机辅助测量与分析手段引入数字化牙颌模型差异的比较。通过两种模型的最佳拟合配准, 不需损伤模型, 得到两种模型的差异分布规律, 类似技术曾用于检验全冠预备体复制模型与原始预备体的一致性并被证明准确可靠^[12]。

4 结论

本文介绍了一种制作牙颌模型的新方法, 设计了对其进行

精确度分析的计算机辅助测量方法。为了解决传统石膏模型制作过程给患者所带来的不适和存储问题, 设计了一种基于CBCT影像数据与熔融沉积3D打印技术联合制作牙颌实体模型的方法, 该方法为改良传统模型提供了新的思路。为了进一步验证3D打印牙颌模型的精确度和解决传统测量的准确性问题, 设计了牙颌模型精确度分析的测量项目与测量标准, 引入了计算机辅助测量和最佳拟合配准技术。通过计算机辅助测量, 验证了3D打印牙颌模型完全能够满足临床精度需要, 表明计算机辅助测量方法可重复性高, 在口腔临床具有良好的应用前景。本研究对下一步设计牙颌模型的制作实验具有指导意义, 本文利用了熔融沉积3D打印技术, 关于选取激光烧结等技术, 仍需利用计算机辅助测量来验证其精确性。

参考文献:

- [1] Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, et al. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models [J]. *Biomedical Engineering Online*, 2013, 12 (1): 49.
- [2] Zhang F, Suh K J, Lee K M. Validity of intraoral scans compared with plaster models: an in-vivo comparison of dental measurements and 3D surface analysis [J]. *Plos One*, 2016, 11 (6): e0157713.
- [3] De W O, Rangel F A, Fudalej P S, et al. Reproducibility and accuracy of linear measurements on dental models derived from cone-beam computed tomography compared with digital dental casts [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2014, 146 (3): 328-336.
- [4] 应怀樵, 沈松, 李旭杰. 第三次工业革命与“软件制造”及“云智慧科技” [J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22 (3): 646-649.
- [5] 王珍珍, 逯宜, 宋君, 等. 光栅投影技术及逆向工程在重建和测量牙颌数字化模型中的应用 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2015, 33 (1): 71-74.
- [6] 赵锦龙, 王鹏程, 刘海亮. 应用激光选区烧结技术制作人体膝关节模型 [J]. *现代制造工程*, 2016 (9): 30-32.
- [7] 吴志辉, 朱双林, 陈奕嘉, 等. 三维数字模型测量在ABO客观评分系统的应用评价 [J]. *中华口腔医学研究杂志: 电子版*, 2014, 8 (3): 39-43.
- [8] Moreira D D, Gribel B F, Torres G D R, et al. Reliability of measurements on virtual models obtained from scanning of impressions and conventional plaster models [J]. *Brazilian Journal of Oral Sciences*, 2014, 13 (4): 297-302.
- [9] Luu N S, Mandich M A, Flores-Mir C, et al. The validity, reliability, and time requirement of study model analysis using cone-beam computed tomography-generated virtual study models [J]. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 2014, 17 (1): 14-26.
- [10] 于海波, 秦祖军, Yu H B, 等. FDM快速成型机原型精度分析及对策 [J]. *装备制造技术*, 2014 (5): 139-140.
- [11] Rahmati S, Vahabli E. Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79 (5-8): 823-829.
- [12] Andreescu C F, Ghergic D L, Botoaca O, et al. The Advantages of High-density Polymer CAD/CAM Interim Restorations in Oral Implantology [J]. *Materiale Plastice*, 2017, 54 (1): 32-36.