

间接法数字化印模及 3D 数据偏差对比实验研究

姜淑凤¹, 刘宏发¹, 周子业¹, 崔超²

(1 齐齐哈尔大学 机电工程学院, 黑龙江, 齐齐哈尔 161001;

2 齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江, 齐齐哈尔 161001)

摘要: 针对口腔数字化诊疗中的牙植入手体逆向建模过程利用光栅 3 维扫描的曲面拟合误差影响建模精度, 传统漏洞修补重构的点云数据拼合失真等问题; 通过对间接牙模型进行逆向建模及拼接误差对比实验, 找出数字化印模重构特征曲面与有效降噪的曲面重构平顺性弥补方法; 得出了优化的实验流程, 通过 3D 数据对比验证不同扫描方式优劣的 3D 分析结果, 研究结果表明改进的实验对比方法有效找出了间接数字化印模的 3DP 植入手体在临床应用中存在误差的原因, 并验证了提高 3 维扫描精度的有效方法, 降低了逆向建模中点云数据漏洞修补畸变率。

关键词: 数字化印模; 偏差分析; 实验对比; 逆向重构; 降低失真率

中图分类号: TH122 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2020)08-0841-08

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2019.289

Experimental Comparison of Indirect Digital Impression and 3D Data Deviation

JIANG Shu-feng¹, LIU Hong-fa¹, ZHOU Zi-ye¹, CUI Chao²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161001, China;

2. College of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161001, China)

Abstract: In the process of dental implant reverse modeling in digital dental diagnosis and treatment, the surface fitting error of three-dimensional raster scanning was used to influence modeling accuracy, and the point cloud data of traditional hole repair and reconstruction was distorted. Through the reverse modeling of indirect dental model and the comparison experiment of splicing error, a method to make up for the smoothness of digital impression reconstruction characteristic surface and effective noise reduction surface reconstruction was obtained, the optimized experimental process was obtained, and the 3D analysis results of different scanning methods were verified by 3D data comparison. The research results show that the improved experimental comparison method effectively finds out the causes of errors in clinical application of 3DP implants with indirect digital impression, and verifies the method for effectively improving 3D scanning accuracy, reducing the distortion rate of point cloud data vulnerability repair in reverse modeling.

Key words: digital impression; deviation analysis; experimental comparison; reverse reconstruction; reducing distortion rate

口腔诊疗中牙植入手体的数字化印模技术, 是近年来随着计算机辅助医疗的发展及逆向工程技术与 3 维

扫描技术在临床上的应用的发展而拓展出的新的医疗技术^[1]. 闫慧鑫等^[2]在口腔数字化诊疗的数字化印模与

收稿日期: 2019-11-22

基金项目: 齐齐哈尔市科技局入库项目(GYGG-201912); 齐齐哈尔大学研究生创新科研项目(YJSCX2019076); 黑龙江省协同创新中心培育项目(135409102)

作者简介: 姜淑凤(1979—), 女, 在读博士生, 副教授, 硕士生导师, E-mail: 474118867@qq.com.

通信作者: 刘宏发(1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: 1589437756@qq.com.

传统印模的应用效果对比方面做了很多研究工作,对临床应用舒适度做了统计学等方面数据对比,验证了数字组的临床有效率(97.78%)显著高于传统组(82.22%)。

应用 3 维扫描后逆向重建牙齿模型的数字化印模技术有两个主要的扫描建模方式,第 1 种是直接法,但该方法受仪器精密度、扫描操作者熟练程度,患者的配合度及口腔环境及牙齿缺损程度影响较大;第 2 种是间接法,即使用 3 维逆向扫描成像仪器进行逆向数字化扫描传统模型,前序工序复杂繁重,后序扫描精度受模型影响较大。使建立的数字化印模与实际缺损植入手体偏差大,使用过程中医患双方舒适度降低,使 3D 打印重建植入手体(牙)临床的应用中需要二次修整模型。由于直接法是新兴方向,掌握传统印模技术的现有工作人员广泛存在,给间接印模提供了原有的普遍性的应用市场。目前的统计数字表明,临幊上主要还是使用间接法获取数字化模型^[3-4]。

在本文通过间接的 3 维扫描牙模数据的曲面光顺与精简方法,利用 3D 分析数据对比分析数字化印模与传统印模制作修复体的逆向重建效果,探讨 3 维扫描的参数与扫描流程在数字化印模中对逆向建模精度的影响,具有支撑现代数字化(3 维逆向扫描)技术在口腔医学领域应用的现实意义。

1 实验模型的建立及被测标本选择

进行间接的数字化印模和传统印模以及口外扫描印模对比实验,并对其准确性、重复性、适合性等方面进行精确度分析,以类比的形式作出有效参数设置的详细效果差异对比,筛选出最优的扫描参数与 3D 打印参数,研究最优制模与 3D 打印植入手体的方法。

1.1 实验仪器设备

本实验采用 InspireS250-3D 打印机 1 台,OKIO-I 型高精度 3 维扫描仪 1 台,实验仪器如图 1、图 2 所示。



图 1 扫描仪及 3D 打印仪器

Fig. 1 Scanner and 3D printing instrument



图 2 文博桌面扫描仪

Fig. 2 Wenbo desktop scanner

1.2 被测标本

标本组的选择考虑到完整健康牙列,间接扫描建模的数字化印模模型,畸形牙齿缺损修复等口腔常见数字化诊疗的需要,做 3 维扫描逆向模型重建的对比实验标本。

实验 1 选择牙全列模型 1 套,模拟健康牙齿人群的全牙列,进行牙齿数字化模型扫描建档,该数字化牙模档案可用于终身跟踪口腔诊疗使用,如图 3



图 3 a 组,被测牙全列标本

Fig. 3 Group a,a complete set of teeth



图 4 b 组,被测石膏牙模标本

Fig. 4 Group b,plaster specimen

所示。实验2选择牙石膏模型2套,是口腔数字化印模间接法的常用标本,如图4所示。人畸形牙齿1个,是利用人真实牙齿作为扫描重建标本,还原牙修复过程中替代植入手制造的真实扫描数据,如图5所示。



图5 c组,被测人牙齿标本

Fig. 5 Group c, human tooth specimen

1.3 实验流程设计

实验流程如图6所示,首先是通过“文博winscan”及“天远3维扫描仪”,对a组、b组、c组所选择的被测标本组进行扫描数据获得,对扫描的点云数据运用“Geomagic Studio”点云处理软件对其进行点云预处理及曲面的光顺性处理^[5]。通过点云去噪,曲面光顺生成数字化模型后,并通过支持向量机(SVM)算法进行曲面边界特征提取,二次修正标本的逆向建模的数字化模型;在处理好的数字化印模的基础上,对其进行模拟口腔咀嚼特征的分析,找出受力不均的部分修正到咬合的合适形状^[6]。然后在Matlab里面运用合适的支持向量机算法对数字化印模求解最优边界提取后的模型,该模型基于几何特征提取^[7]。

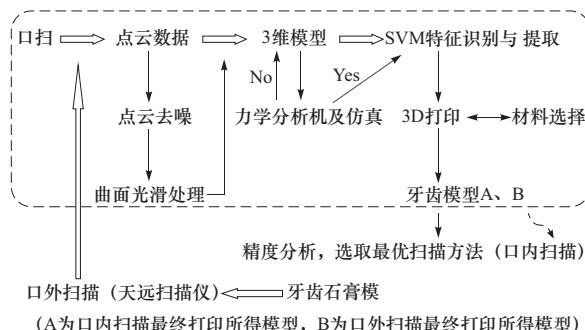


图6 实验与数据挖掘分析流程

Fig. 6 Experiment and data mining analysis process

对不同方式扫描所得的口腔数字化印模数据分别进行精度对比,验证人牙齿数字化印模的有效方法。

实验与分析过程应用在口腔诊疗的实践中,可以建立个人的口腔数字化印模档案,在需要的时候进行调取制模的过程,实现传统印模与数字印模“四位一体”修复的应用,其相对于传统咬模制牙的优势在于将病人牙齿信息存储在数据库中,方便下次就医直接调取,省去了随着年龄增长口腔后续诊疗的再扫描的过程^[8]。

2 实验过程及数据分析过程

实验采用间接口外扫描后3D分析对比的方式,对被测标本组进行光学扫描生成逆向重构的3维模型,对生成的数字模型进行曲面拟合的光顺处理,提高重建曲面精度^[9]。

2.1 对比实验过程

本实验利用3维扫描仪扫描,将被测标本(a实验)的多点拼接提取3维模型的点云数据进行曲面重构,以a组标本作为模拟健康人牙列的验证组。

实验流程如参照1.3节,扫描得到标本的扫描点云数据,利用Geomagic studio软件,n为拼接点数目,经过n点拼接拟合后得到3维重构数据模型,利用曲面漏洞修补功能补齐扫描缺陷,建立二次逆向重构数据模型;对比验证实验过程如下:采样另外2组(b、c实验),在b、c实验中,采用传统牙齿植入手的石膏牙模和人牙齿(患者拔掉的牙齿)做间接扫描,改变实验参数的设定,应用计算机软件后处理,得到的数据利用Geomagic studio软件中的标准差分析功能。不同的间接扫描方式实验过程中生成的点云数据截图如图7所示。

选择按照标志点拼接扫描,分别对3组模型进行间接数字化印模的3维逆向重建,在第b组与第c组中实验中采用标志点环境补偿的粘贴方式,在进行N次扫描,每一次扫描旋转移动标本的角度大于30°后得到点云数据。

B实验曲面重构过程如图8所示,采样b组n=4点拼接数据作为参考数值拟合过程截图,可以得出精度对比的目视效果,在间接数字化印模中,扫描石膏模型精度不高。

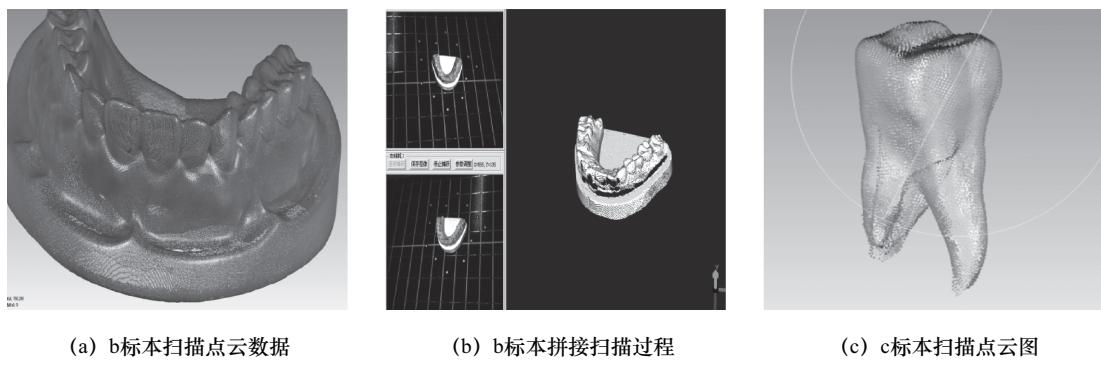
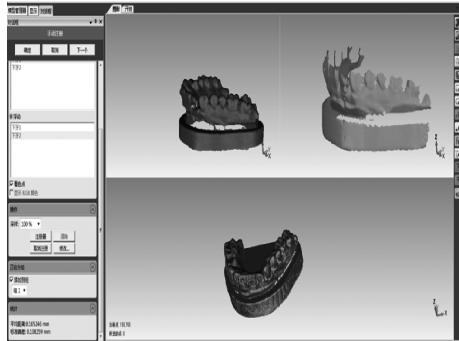
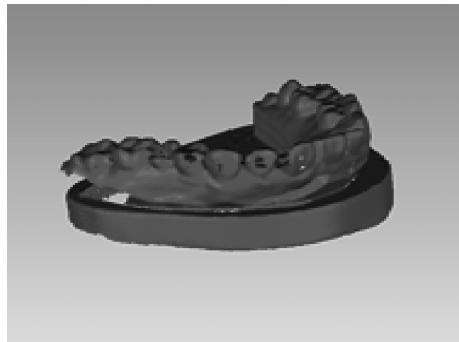


图 7 点云数据图

Fig. 7 Point cloud data map

图 8 b 样本 2 组点云数据拟合 $n=4$ 拟合过程Fig. 8 Fitting process of two groups of point cloud data of b sample $n=4$ 图 9 实验 b 中 n 点拟合后未修补模型Fig. 9 n -point fitting model in experiment b without repair

2.2 偏差分析与改进实验

如果牙植入体的间接咬模的逆向建模仅限于对于模型的重构，则只是基于线结构光的 3 维牙模扫描在形状上对它的复制，并不能做到从精确度上精准复原，因此对重构模型进行误差分析是非常必要的一个环节。而医疗用数字化印模的建模与医用植入手体的 3 维打印体的应用效果的好坏，一定程度上还依赖打印机的性能^[10]。

在偏差分析功能的技术支持下，建立模型的误

差分析模型，根据图 9 所示，是 b 组实验没有修补漏洞时的 $n=4$ 点拟合后的 3 维模型。

实验 b 中模型数据偏差太大，所以对 c 样本的实验进行了改进，并进行了数据验证对比。

对 c 组改变了 3 维光栅扫描仪的扫描方法，增加了扫描分块，进行了 3 次扫描获得 c 样本的 3 组扫描数据，如图 10 所示，拟合时分成 $n=4$ 点 c-1 组数据与 $n=3$ 点 c-2 组数据进行一次拼接得中间数据组 c₁₂，中间数据 c₁₂ 与 $n=3$ 点 c-3 组数据进行拟合得到 c 样本的 3 维逆向重构模型。

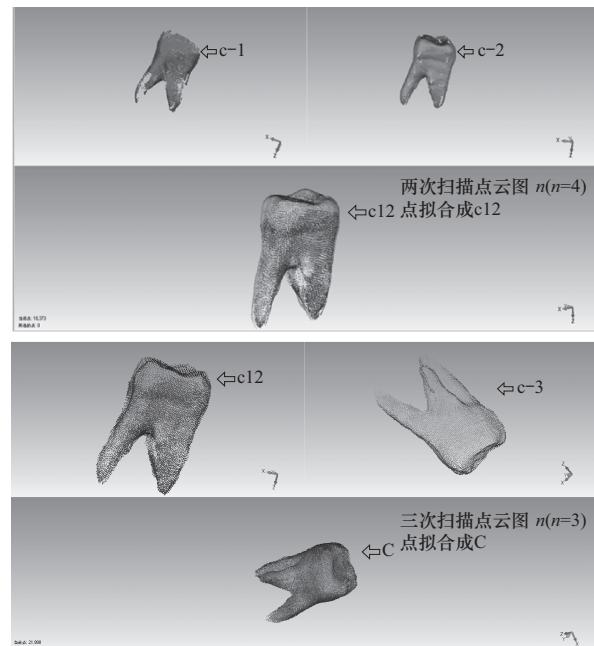
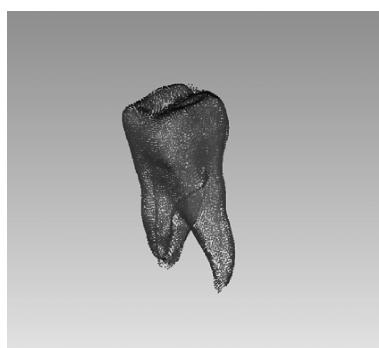


图 10 c 样本采样过程(扫描点云拟合过程)

Fig. 10 c sample sampling process(scanning point cloud fitting process)

图 11 为 c 样本点云数据，为 c 实验分组拟合过程的未修补的点云图，可以得出精度对比的目视效果，在间接数字化印模中，人牙齿扫描效果较好。

图 11 实验 c 中 n 点拟合未修补模型Fig. 11 n -point fitting model in experiment c

如表 1 所示,对 b 组第 1 次试验的模型的偏差分析得到这组实验的标准差达到 0.108 259 mm, c 标本采样效果良好,标准偏差为 0.076 573 mm, 在后续实验中进行了 3 维参数验证精度的准确性。

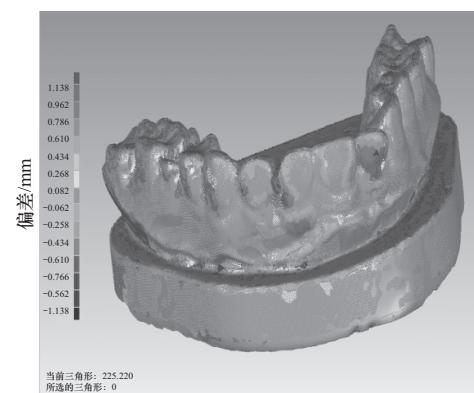
表 1 b、c 两组 n 点拟合数据分析统计表Tab. 1 Statistical table of n -point fitting data analysis of b and c groups

实验次序	平均距离/mm	标准偏差/mm
b	0.165 246	0.108 259
c	0.162 277	0.076 573

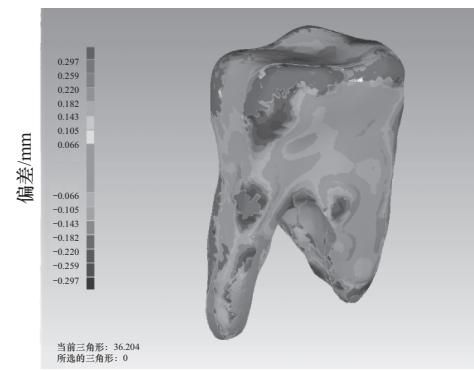
2.3 前序实验数据对比

上述实验过程得到得 3 维点云数据,用于后续数字化模型重构,得到被测标本的 3 维拟合曲面模型,在对模型曲面修补过程中,标本的不规则曲面在扫描过程中出现了漏洞,增加了修补曲面的难度,采用曲面重构的漏洞修补,需要找到更适合曲面修补的算法来对其进行重建。曲面重构修补完成后,将 a、b、c 3 个标本的扫描实验得到的结果和数据进行全局注册,得到全局 3 维分析数据,如图 12 所示两次试验的最佳拟合全局注册对齐对比,对比得出表 2 对比数据,由于 a 为健康牙列文博扫描数据作为本次实验的标准参考值,在表 2 中不做比较。b 组与 c 组是本实验的被测物标本的实验数据。

b、c 两组实验的数据进行全局注册,如表 2 所示。全局注册数据分析统计表可以得到如下结果:b 标本的采样实验标准差为 c 标本采样实验标准差的 2.761 倍。通过数据对比得出,对于 3 维扫描数字化印模来说,不同扫描角度的点云数据越多, n 拟合过程中能够找到的相似点越多,曲面拟合越容易重合,偏差越低。



(a) b 标本的全局 3D 分析



(b) c 标本的全局 3D 分析

图 12 两次试验的最佳拟合全局注册对齐对比图

Fig. 12 Best fit global registration alignment comparison of two experiments

表 2 b、c 两次实验全局注册数据分析数据

Tab. 2 Analysis of global registration data of b and c experiments data

实验次序	最大距离/mm	平均距离/mm	标准偏差/mm
b	1.138 078	0.082 049	0.153 984
c	0.297 415	0.066 237	0.055 775

2.4 3D 模型偏差分析

在进行曲面拟合模型重构的过程,本研究采用 3D 模型偏差分析用来验证重构模型的真实性,验证曲面拟合的完整性等参考指标。图 13~15 为 3 组

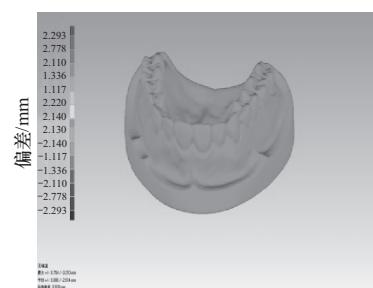
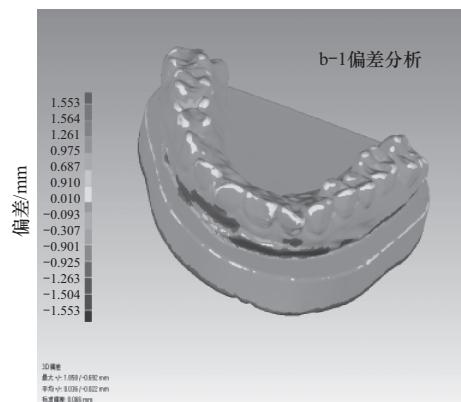


图 13 实验 a 中 3D 模型偏差分析

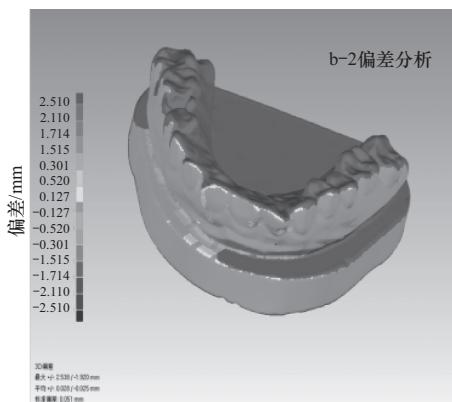
Fig. 13 Deviation analysis of 3D model in experiment a

不同扫描标本的数字化印模的 3D 比较图,其中实验 c 的 3D 模型偏差分析可以从颜色参考上明显看



(a) b-1偏差分析

出精准度大大提高,这个 3D 比较是按照软件库中的参数比对,得出逆向建模精度的有效分析。



(b) b-2偏差分析

图 14 实验 b 中 3D 模型偏差分析

Fig. 14 Deviation analysis of 3D model in experiment b

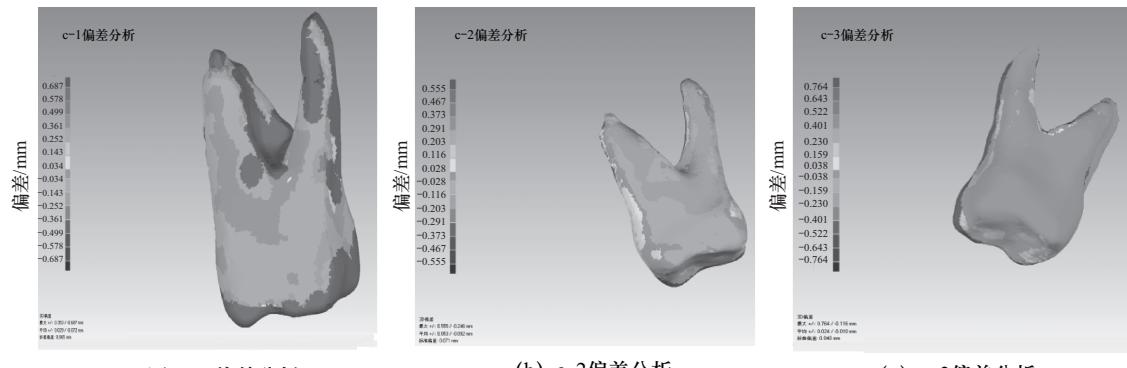


图 15 实验 c 中 3D 模型偏差分析

Fig. 15 Deviation analysis of 3D model in experiment c

3 个被测标本的 3 组多次实验,每一次的 3 维模型进行 3D 偏差分析的结如表 3 所示,为 6 次封装体的偏差分析统计数据。

表 3 a、b、c 三次实验中 3D 偏差分析

Tab. 3 Analysis of 3D deviation in three experiments of a,b and c

实验次序	最大距离/mm	平均距离/mm	标准偏差/mm
a	+0.754/-3.210	0/-2.614 -0.001	0.038
	+1.858/-0.692	+0.036/-0.022 0.009	0.066
b	+2.538/-1.920	+0.028/-0.025 0.001	0.051
	+0.353/-0.687	+0.029/-0.072 -0.051	0.065
c	+0.555/-0.246	+0.053/-0.092 -0.068	0.071
	+0.764/-0.116	+0.024/-0.010 0.009	0.040

根据表 3 所示数据得出,在 a 实验中的模型的 3D 偏差最小,为 0.038mm;b 实验中的 2 个模型与 c 实验中第 1 组、第 2 组实验模型的 3D 偏差接近,彼此偏差的差值在 0.1 左右;而在 c 实验中,采用扫描第 3 次获得点云数据与前序该标本的 3 维扫描数据拼接后的 3D 偏差明显减少,为 0.040 mm。在实验中改进了 c 组实验方法,对比实验的结论为点云数据的增加使得曲面更好地拟合,从而使得最终 3D 模型的偏差变小。

3 3D 效果比较与实验结论

在进行 3 组实验与数据采集之后,利用 a、b、c 实验数据建立的被测标本的 3 维模型,对比分析 3D 偏差与打印效果的 3 维纹理特性。

3.1 实验证明

b 组实验的口腔修复诊疗的间接扫描印模的效果

不好,在间接扫描石膏模型一次扫描建模偏差大,需要后续技术人员利用软件重构才能达到植入手体建模需

要;a与c组实验的效果较好.图16为建立的基于光栅3维扫描曲面拟合重构的牙植入手体标本的3维效果图.

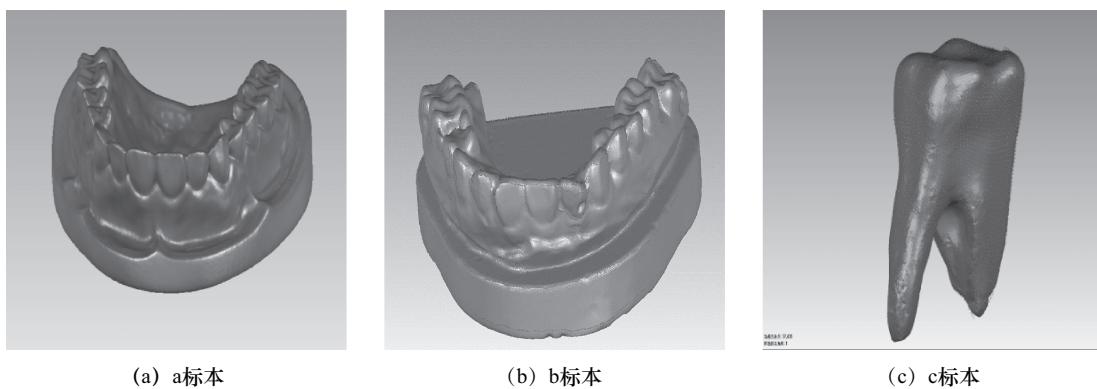


图16 3组实验标本3维效果图

Fig. 16 Three dimensional renderings of three groups of experiments

在对模型曲面漏洞修补过程中,不规则标本与曲面扫描方式增加了修补曲面的难度.利用Geomagic studio软件中的漏洞修补指令,利用实验者经验找到漏洞修补的切入点很重要.修补块的多少与大小影响了医学领域植入手体建模形成闭合曲面的精度.

通过图16与1.2节的实际标本图的对比可以看出,3维模型与被测标本的相似度不同,通过对实验数据的分析,得出3种不同被测标本不同的n点拼接拟合后偏差如图17所示.a组实验标准3D偏差0.0388,b组实验标准3D偏差0.0585 mm,c组实验标准3D偏差0.040 mm,a组效果最好,c组对b组效果次之,b组3D偏差最大.

有代表性的点,选取两个带拼接点云最相似的部位,这样可以大大提高拟合的精确度,降低数字化印模中点云数据漏洞修补畸变率.

② a组n点拟合偏差与全局偏差接近,但3D偏差较大;b组的3种偏差不一致,这一点验证了间接模式扫描精度难以控制这个结论;c组的3种偏差分散,这与牙齿实物的3维扫描情况一致,验证了不同的人牙齿形状不同,建模与3D打印植入手体的适应度不同,3维逆向建模的畸变率不同.

③ a组实验作为健康牙全列标本扫描与重建效果的精度最高;b组实验方法为目前常用的间接法数字化印模技术,扫描数据获得后依赖逆向软件与曲面重构人员的技术支持较多,需要更多的漏洞修补与曲面拟合才能提高了其的外表面曲面重建的精准度;c组作为间接印模中真实牙齿3维扫描,实验标本与牙植入手体真实性相似比可以达到99%以上,其3D比较数据的偏差较小,3维模型重构过程简单,对后序曲面拟合工作量小.

④ 当数字化印模所测模型形状不规则时,可考虑增加几个不同角度的点云数据图拟合,这样可以大大降低模型最终的偏差值.但一定要选取适量的点云数据,每次拟合都存在着误差,拟合次数过多也会增大偏差值.

4 结 论

本研究的实验方法是数字化印模间接扫描的技术应用,是临床数据采集与分析的流程优化的技术支持,并通过建立对比实验模型,分析对比实验过程

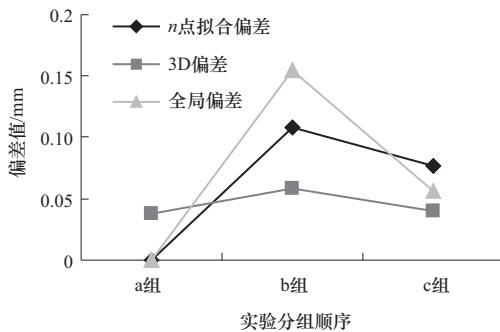


图17 实验偏差结论

Fig. 17 Conclusion of experimental deviation

3.2 实验结果分析

① 实验设备不同,标本的3维形态不同,对扫描精度有影响,但可以通过增加拼接次数来弥补扫描误差改善这个弊端;在n点拟合时一定要选最具

数据,得出光栅 3 维扫描逆向曲面拟合的牙植入体间接建模的有效方法,是对逆向重建模型数据误差分析与 3D 打印植入手体的优化。研究实验方法完备可行,实验过程与预期结论可用于逆向工程技术在数字化口腔诊疗中的技术支持。但在在曲面拟合重构过程中,技术人员的选取的拟合点,选取的漏洞修补切入点对 3D 偏差也有很大影响,需要在进一步的研究中找到拟合点选取与拟合次数 n 的取值对模型重构精度影响的线性关系。

参考文献:

- [1] Mohamed Z, Nimit B, Hannah B, et al. Creating customized oral stents for head and neck radiotherapy using 3D scanning and printing[J]. Springer Journal, 2019, 14(1): 1–8.
- [2] 闫慧鑫,呼海燕,逯宜,等.数字化印模与传统印模在牙体缺损修复中的应用效果比较[J].陕西医学杂志,2019,48(9):1155–1158.
Yan Huixin, Hu Haiyan, Lu Yi, et al. Comparison of the effect of digital impression and conventional impression in the treatment of tooth[J]. Shanxi Medical Journal, 2019, 48(9): 1155–1158. (in Chinese)
- [3] 谢明杰,李潇.影响 3D 打印的口腔修复体精密度的因素[J].口腔医学,2018,38(9):860–864.
Xie Mingjie, Li Xiao. Factors affecting the precision of 3D printing prosthesis[J]. Stomatology, 2018, 38(9): 860–864. (in Chinese)
- [4] Amin S, Weber H P, Finkelman M, et al. Digital vs. conventional full-arch implant impressions: a comparative study [J]. Clin Oral Implants Res, 2017, 28(11): 1360–1367.
- [5] 姜淑凤,张英琦.逆向重建中 B 样条曲面过渡/微调精简方法[J].北京理工大学学报,2018,38(8):802–807.
Jiang Shufeng, Zhang Yingqi. B-spline surface transition/fine-tuning reduction method in reverse reconstruction [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(8): 802–807. (in Chinese)
- [6] 黄丽媛,吴南寿,王雪花,等.基于特征向量提取和 SVM 分类器的课堂人脸识别研究[J].仪器仪表用户,2019,26(2): 15–17.
Huang Liyuan, Wu Nanshou, Wang Xuehua, et al. Research on classroom face recognition based on feature vector extraction and SVM classifier[J]. Electronic Instrumentation Customers, 2019, 26(2): 15–17. (in Chinese)
- [7] 周蓬勃,赵夫群,武仲科.基于几何特征的兵马俑断裂面匹配方法[J].北京理工大学学报,2019,39(5):532–538.
Zhou Pengbo, Zhao Fuqun, Wu Zhongke. Fracture surface matching method of terracotta based on geometric features[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(5): 532–538. (in Chinese)
- [8] Gherlone E, Cappare P, Vince R, et al. Conventional versus digital impressions for all-on-four restorations[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2016, 31(2): 324–330.
- [9] 纪小刚,薛杰,杨艳,等.基于线性假设的多分辨率光滑精度控制[J].北京理工大学学报,2015,35(11):1128–1134.
Ji Xiaogang, Xue Jie, Yang Yan, et al. Multiresolution fairing precision control based on linear hypothesis [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(11): 1128–1134. (in Chinese)
- [10] Feuerbach T, Kock S, Thommes M. Characterisation of fused deposition modeling 3D printers for pharmaceutical and medical applications[J]. Pharmaceutical Development and Technology, 2018, 23(10): 1–33.

(责任编辑:刘雨)