

无牙颌种植修复数字化印模口外扫描与口内扫描的精度比较研究

杨咏涛¹ 李欣² 商相宜¹ 单坤瑶¹ 李文博¹ 秦庆钊³ 王勇³ 赵一姣¹

1. 北京大学医学部医学技术研究院, 北京 100191;

2. 青岛大学附属医院口腔种植科 青岛大学口腔医学院, 青岛 266100;

3. 北京大学口腔医学院·口腔医院, 数字化研究中心/口腔修复教研室, 国家口腔医学中心, 国家口腔疾病临床医学研究中心, 口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心, 国家卫生健康委口腔数字医学重点实验室(中国医学科学院口腔数字医学重点实验室), 口腔数字医学北京市重点实验室, 北京 100081

[摘要] 目的 评估自主研发的基于四目立体摄影测量技术的种植口外扫描系统在获取种植体三维位置信息方面的精准度, 并与口内扫描系统进行对照研究。方法 借助体外无牙颌种植模型, 分别使用口外扫描系统和口内扫描系统获取含有种植体三维形态和位置信息的STL(Standard Tessellation Language)数据, 作为实验组和对照组, 使用牙颌模型扫描仪获取参考数据, 在Geomagic Wrap 2021软件中分析实验组和对照组与参考数据的三维形态偏差、线性偏差和角度偏差, 比较2组的正确度和精密度。结果 口外扫描系统在三维形态偏差、线性偏差和角度偏差的正确度上均优于口内扫描系统, 且差异具有统计学意义($P<0.001$)。口外扫描系统在三维形态偏差上的精密度也高于口内扫描系统($P<0.001$)。随着种植体数量的增加, 口外扫描系统的三维形态偏差和线性偏差有所上升($P<0.001$), 但角度偏差变化差异无统计学意义, 而口内扫描系统的三维形态偏差、线性偏差和角度偏差均有增加($P<0.05$)。结论 基于立体摄影测量技术的口外扫描系统在获取多单位种植体位置信息方面的精度优于口内扫描系统, 为实现全流程无牙颌种植数字化修复提供了新的思路。

[关键词] 无牙颌种植; 数字化印模; 立体摄影测量; 口内扫描; 精度

[中图分类号] R783 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025.2025077



本文链接 开放科学标识码

Comparative study on the accuracy of extraoral scanning versus intraoral scanning in digital impressions for implant restoration in edentulous jaws

Yang Yongtao¹, Li Xin², Shang Xiangyi¹, Shan Shenyao¹, Li Wenbo¹, Qin Qingzhao³, Wang Yong³, Zhao Yijiao¹

1. Institute of Medical Technology, Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China; 2. Dept. of Oral Implantology, Affiliated Hospital of Qingdao University, School of Stomatology, Qingdao University, Qingdao 266100, China; 3. Center of Digital Dentistry Central Laboratory/Dept. of Prosthodontics, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Research Center of Oral Biomaterials and Digital Medical Devices & NHC Key Laboratory of Digital Stomatology (Key Laboratory of Digital Stomatology, Chinese Academy of Medical Sciences) & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China

[收稿日期] 2025-02-28; **[修回日期]** 2025-10-10

[基金项目] 北京市自然科学基金(L232100, L242132); 国家自然科学基金(82271039, 82071171); 国家重点研发计划(2022YFC2405401)

[第一作者] 杨咏涛, 硕士, E-mail: yongtaoyang2024@163.com

[通信作者] 王勇, 教授, 硕士, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn; 赵一姣, 高级工程师, 硕士, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn

Supported by: Beijing Natural Science Foundation (L23-2100, L242132); the National Natural Science Foundation of China (82271039, 82071171); National Key Research and Development Program of China (2022YFC24-05401)

Correspondence: Wang Yong, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn; Zhao Yijiao, E-mail: kqcadcs@bjmu.edu.cn

[Abstract] Objective To evaluate the accuracy of a self-developed extraoral scanning system based on four-camera stereophotogrammetric technology in the acquisition of three-dimensional positional information on dental implants and conduct a comparative study involving an intraoral scanning system. **Methods** With the use of an *in vitro* edentulous jaw model with implants, extraoral (experimental group) and intraoral (control group) scanning systems were employed to obtain STL (Standard Tessellation Language) datasets containing three-dimensional morphological and positional information on scan bodies. In addition, a dental model scanner was used to obtain reference data. The three-dimensional morphological, linear, and angular deviations between groups and reference data were analyzed using Geomagic Wrap 2021 software to compare trueness and precision. **Results** The extraoral scanning system demonstrated superior trueness in three-dimensional morphological, linear, and angular deviations compared with the intraoral scanning system, with statistically significant differences ($P<0.001$). The extraoral scanning system also showed a higher precision in three-dimensional morphological deviation ($P<0.001$). As the number of implants increased, the extraoral scanning system exhibited increased three-dimensional morphological and linear deviations ($P<0.001$) but maintained a stable angular deviation. The intraoral scanning system displayed significant increases in three-dimensional morphological, linear, and angular deviations with the increase in the number of implants ($P<0.05$). **Conclusion** The stereophotogrammetry-based extraoral scanning system outperforms intraoral scanning system in terms of the accuracy for multi-unit implant positioning and provides a novel approach for attaining a fully digital workflow for implant rehabilitation in edentulous jaws.

[Key words] edentulous implant; digital impression; stereophotogrammetry; intraoral scan; accuracy

全口种植并采用螺丝固位的一段式修复体是无牙颌患者常用的修复方式。为了获得长期稳定的修复效果，种植体和桥架之间需要达到精确的匹配，也就是被动就位。若不能达到理想的被动就位，会出现螺丝松动、桥架折断等机械并发症^[1]，或者细菌微渗漏产生生物学并发症^[2]，甚至导致种植失败。因此，准确记录种植体的空间位置非常重要。全口种植的数字化修复在牙科领域应用越来越广泛，数字化印模作为数字化种植修复的第一步，其准确性对于桥架获得良好的被动就位至关重要。

口内扫描仪 (intraoral scanners, IOS) 是数字化工作流程的关键组成部分，其可以记录口内解剖形态和种植体位置，与传统种植印模方法相比，具有可接受的准确性^[3-4]。随着不断迭代更新，口内数字化印模的准确性已得到显著提升^[5]，可以在几分钟内扫描整个牙弓，从而提高了患者的体验和临床效率^[6]。并在常规修复、正畸、颌面外科等领域得到广泛应用^[5]。尽管 IOS 被广泛使用，但其在全牙弓数字化印模的准确性表现欠佳仍是口腔临床上面临的一个问题^[7]。目前主流 IOS 系统的基本原理是通过小面积单视场扫描数据的连续重叠拼接得到扫描对象的全部表面数据^[8]。在全牙弓种植扫描过程中，由于口腔黏膜没有明确的形态特征参考点，多视场拼接的累积误差可使整体扫描

精度下降^[9]，导致扫描困难和潜在的数据变形。因此 IOS 系统在全弓种植印模中的应用仍然存在争议^[10]。

立体摄影测量 (stereophotogrammetry, SPG) 是一种与前述 IOS 系统不同的数字印模技术，其可从口外独立捕捉种植体的三维位置信息，为弥补口内数字化扫描因识别和拼接困难导致的准确性欠佳提供了新的解决思路。SPG 的原理是通过立体相机从不同角度拍摄同一物体，通过捕获多幅图像中的对应特征，计算获得三维对象空间关系，生成三维坐标信息^[11]。将配备多个光学摄像头的 SPG 系统置于口腔外适当距离处，从不同方向获取特殊扫描杆上的特征点，从而确定扫描杆的位置和方向，因此又称“口外扫描”^[12]。不同于口内扫描，SPG 不需要图像拼接，扫描过程不依赖口内解剖结构，几乎不受口内情况影响^[13]，具有良好的准确性，同时速度快、效率高。

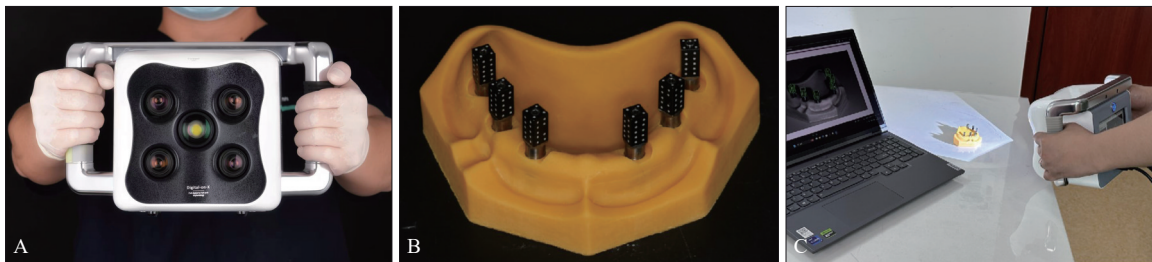
目前国内口腔临床上使用的无牙颌种植口外扫描系统主要以国外产品为主，如 ICam4D (Imetric4D Imaging Sàrl, 瑞士)、PIC (PIC Dental, 西班牙) 等。课题组针对国内在无牙颌种植口外扫描技术领域的空白，自主研发出基于四目立体摄影技术的种植口外扫描系统 (称为“CMEOS”系统)，本研究通过开展体外无牙颌种植模型的扫描精度评价研究，系统分析自研设备在获取种植体

三维位置信息方面的正确度和精密度表现,并与目前口腔临床使用的主流口内扫描系统进行对照研究,以期为无牙颌种植口外扫描系统的国产化研发提升及后续临床评价研究奠定基础。

1 材料和方法

1.1 设备、材料及软件

牙颌模型三维扫描仪DS-EX Pro(杭州先临三维科技股份有限公司),精度 $\leq 10\ \mu\text{m}$,用于获取含有体外模型种植体形态和位置的STL(Standard Tessellation Language)数据;口内扫描仪Trios 3(3Shape公司,丹麦),精度 $\leq 15\ \mu\text{m}$,获取种植体形态和位置的对照组数据;课题组自研种植口外扫描系统(CMEOS)(图1),单镜头160万像素,作为实验组;CMEOS系统专用扫描体(图1B);



A: CMEOS系统主体; B: 专用扫描体安装于模型1; C: CMEOS系统操作。

图1 设备、专用扫描体及扫描操作场景

Fig 1 Equipment, specialized scan bodies and scanning operation scenario

1.2 体外实验模型的设计与制作

由北京大学口腔医院技工室标准化阴模灌制上颌无牙颌石膏模型1副。采用牙颌模型三维扫描仪获取无牙颌石膏模型的STL数据。根据Nobel ACT替代体的尺寸,在Magics 21.0软件中设计含有两段圆柱的“虚拟替代体”STL数据,其中上段圆柱直径4.80 mm、高度4.80 mm,下段圆柱直径3.50 mm、高度8.70 mm。将扫描的无牙颌模型和上述虚拟替代体STL数据导入Geomagic Wrap 2021软件中,在具有临床经验种植医师指导下,将多个虚拟替代体数据以相互平行且垂直于无牙颌模型底座的方式放置在模型中模拟临床种植位点,分别构建出含有6颗(双侧2、4、6牙位)、8颗(双侧1、3、5、7牙位)种植位点的虚拟无牙颌种植模型,分别命名为“无牙颌种植实验模型1”(简称“模型1”)和“无牙颌种植实验模型2”(简称“模型2”)(图2A、B)。采用DLP-睿逸DLP1080EA三维树脂打印机对输出的模型1和模型2 STL数据进行树脂模型的打印制作,打印层

DLP-睿逸DLP1080EA树脂三维打印机和三维打印树脂材料T-MRD-521(深圳大族激光科技产业集团股份有限公司),用于3D打印体外无牙颌种植树脂模型。复合基台替代体ACT(Nobel Biocare,瑞典),置于树脂模型中模拟种植体;扫描显影剂(亿桥扫描,韩国),均匀喷涂于树脂模型表面增加模型扫描精度;种植口外扫描用扫描帽(ICam4D $\Phi 1.4\ \text{mm}$,瑞士),配合口内扫描获取种植体形态和位置信息;STL格式标准扫描帽(ICam4D $\Phi 1.4\ \text{mm}$,瑞士)数据,用于替换模型扫描仪获取STL数据中的扫描帽部分,得到参考组数据;三维逆向工程软件Geomagic Wrap 2021(3D System,美国),用于数据的形态偏差和测量分析;Magics21.0(Materialise,比利时),用于设计数字化体外无牙颌种植模型。

厚 $50\ \mu\text{m}$,并依照官方指导进行后处理。最后将Nobel ACT替代体放入模型对应植体位置并稳定定位(图2C、D)。

1.3 实验模型数据的获取与处理

为了避免三维打印树脂模型收缩产生误差,本研究参考数据、实验组数据和对照组数据均针对新打印固化的实验模型进行扫描(1 h以内),并在同1 d内完成后续实验数据的测量。

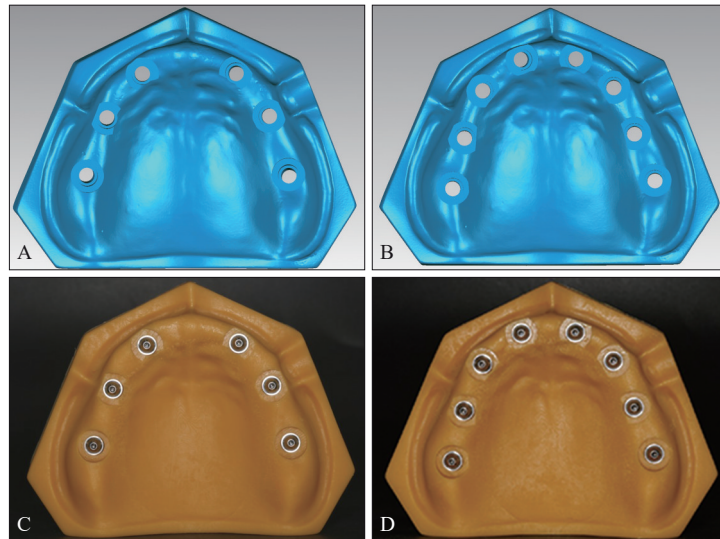
1.3.1 参考数据的获取与处理

在模型1和模型2的替代体上分别安装6颗或8颗实体扫描帽(ICamRef),并在其表面均匀喷涂显影剂。使用牙颌模型三维扫描仪(DS-EX Pro)扫描装有实体扫描帽的模型1和模型2并输出STL数据。

为了确保参考组扫描帽数据与实验组和对照组数据进行比较时的数据范围一致,同时避免显影剂对实体扫描帽表面的改变影响形态偏差分析结果,牙颌模型扫描获得的STL原始数据需将龈方扫描帽数据替换为标准扫描帽数据,在Geomag-

ic 软件中的具体操作方法为：1) 使用“曲率选择”功能，敏感度设置为 0.4，选择出扫描数据上单个扫描帽的上平面数据，并拟合顶部平面（图 3A）；2) 使用“平面偏移”功能，将拟合平面向龈方平移 6 mm 得到裁剪平面，保留裁剪平面上方扫描帽数据（图 3B）；3) 导入标准扫描帽（ICamRef）

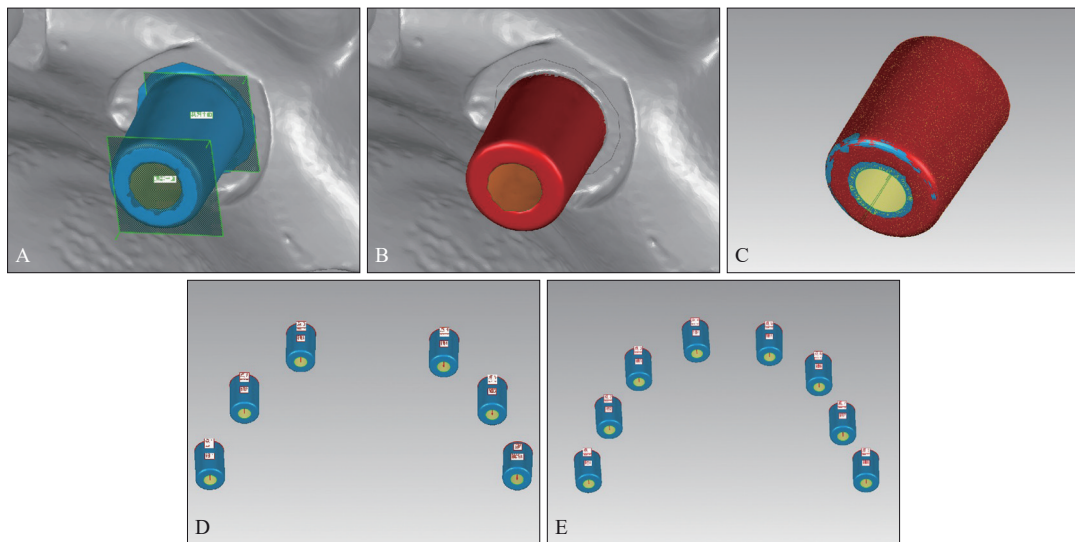
STL 数据，使用“最佳拟合对齐”功能，基于单个扫描帽范围的数据对标准扫描帽数据和原始扫描帽进行配准，以配准后的标准扫描帽数据替换原始扫描帽数据（图 3C），获得本研究的参考数据（Model_Ref）（图 3D、E），用于后续分析实验组和对照组数据的金标准参考。



A: 模型 1; B: 模型 2; C: 三维树脂打印模型 1; D: 三维树脂打印模型 2。

图 2 无牙颌种植体外实验模型的设计及制作

Fig 2 Design and production of *in vitro* edentulous implant models



A: 拟合顶部平面并创建裁剪平面; B: 保留裁剪平面上方扫描帽数据; C: 标准扫描帽数据和原始扫描帽配准; D: 模型 1 的参考数据; E: 模型 2 的参考数据。

图 3 STL 格式模型扫描数据的处理

Fig 3 Processing of scan data in STL format

1.3.2 对照组数据的获取与处理

将口内扫描仪（Trios 3）进行校准，对分别安装了 6 颗或 8 颗实体扫描帽的模型 1 和模型 2 采用如下扫描策略获取扫描帽数据：从左上后牙区扫

描帽的咬合面开始到右侧后牙区，然后转到腭面，最后到颊面。对模型 1 和模型 2 分别重复扫描 10 次，并输出各次扫描的 STL 数据。参照 1.3.1 的方法裁剪扫描帽数据并保留，作为本研究的对照组

数据 (Group_IOS)。

1.3.3 实验组数据的获取与处理

在模型1和模型2的基台替代体上安装自研系统 (CMEOS) 专用扫描体, 对系统校准后由同一名熟练使用口外扫描设备的操作者从右侧后牙区颊侧缓慢移动至左侧后牙区颊侧完成一次完整扫描轨迹。对模型1和模型2分别重复扫描10次, 自研系统配套软件可直接将扫描原始数据中的扫描体数据替换为标准扫描帽并输出STL数据, 作为本研究的实验组数据 (Group_SPG)。

1.4 扫描精度的正确度研究

1.4.1 扫描帽三维形态偏差 (简称“形态偏差”) 的正确度

在Geomagic Wrap 2021软件中, 分别将上述实验组和对照组数据 (模型1和模型2各10个扫描数据) 与参考数据 (Model_Ref) 使用“最佳拟合对齐”功能进行全局配准, 并使用“3D比较”功能, 通过公式计算2个数据间对应最近点间距离的均方根 (root mean square, RMS), $RMS(A \rightarrow B) =$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{A,i} - X_{B,i})^2}{n}}$$

n 代表参考模型上测量点的数量, $X_{A,i}$ 表示测试模型上的第 i 个测量点, $X_{B,i}$ 表示参考模型上对应于 $X_{A,i}$ 的距离最近点, 获得实验组数据与参考数据、对照组数据与参考数据的扫描帽形态偏差各10个RMS值。计算平均值和标准差, 各自的平均值代表了实验组和对照组的形态偏差正确度, 并得到偏差分析的色阶图。

1.4.2 扫描帽特征距离线性偏差 (简称“线性偏差”) 的正确度

在Geomagic Wrap 2021软件中, 对所有扫描帽数据使用“特征-直线-旋转轴”功能拟合特征轴线, 使用“特征-圆-实际边界”功能拟合圆方特征圆, 使用“特征-点-平面与直线”功能基于特征轴线和特征圆创建该扫描帽底部中心点 (简称“底点”)。使用“分析-从特征测量距离”功能测量每次扫描获得STL数据中任意2个扫描帽底点间距离。将从参考组获得的数据作为真值, 将对照组与实验组的数据分别减去参考组的数据, 最终各组线性偏差值。

1.4.3 扫描帽特征轴角度偏差 (简称“角度偏差”) 的正确度

利用1.4.2得到的扫描帽特征轴线, 在软件中使用“采集-测量特征”功能测量每次扫描获得STL数据中任意2个扫描帽轴线间角度。将从参考

组获得的数据作为轴线角度的真值。分别测量对照组与实验组扫描帽的轴角角度, 将对照组与实验组的数据分别减去相应的参考组的数据, 最终获取各组角度偏差值。

1.5 扫描精度的精密度研究 (针对扫描帽三维形态偏差的精密度)

在Geomagic Wrap 2021软件中, 分别对实验组 (Group_SPG) 模型1和模型2的各10个扫描数据两两组合, 使用“最佳拟合对齐”功能进行全局配准。使用“分析-3D比较”功能, 计算获得两两比较的扫描帽三维形态偏差RMS值, 共45个形态偏差RMS值。计算45个值的平均值和标准差, 平均值代表了自研CMEOS系统的扫描精密度。

同上方法, 获得对照组 (Group_IOS) 模型1和模型2各两两比较的45个形态偏差RMS值。计算45个值的平均值和标准差, 代表Trios系统扫描精密度。

1.6 统计分析

采用SPSS 26.0软件进行统计学分析, 采用Shapiro-Wilk检验验证形态偏差数据是否符合正态分布, 采用Kolmogorov-Smirnov检验验证线性偏差、角度偏差数据是否符合正态分布, 对符合正态分布的数据以 $\bar{x} \pm s$ 形式表示, 非正态分布的数据以 $M (IQR)$ 形式表示。若数据符合正态分布且方差齐, 采用独立样本 t 检验比较实验组与对照组和各组内的数据差异, 否则采用Mann-Whitney U 检验比较数据差异, 检验水平为双侧 $\alpha=0.5$ 。

2 结果

2.1 正确度结果

2.1.1 扫描帽三维形态偏差的正确度结果

实验组扫描模型1和模型2获得的扫描帽三维形态偏差正确度结果优于对照组, 且差异具有统计学意义 ($P<0.001$)。实验组内和对照组内的三维形态偏差均值随替代体的增加而上升, 且均具有统计学意义 ($P<0.001$) (表1)。

表1 扫描帽三维形态偏差的正确度结果

Tab 1 Trueness results of the 3D shape deviation for scan bodies $\mu\text{m}, n=10$

组别	模型1	模型2	t 值	P 值
实验组	21.48±0.60	38.84±0.86	-52.317	<0.001
对照组	100.26±5.75	124.34±14.21	-4.968	<0.001
t 值	-43.118	-18.992		
P 值	<0.001	<0.001		

2.1.2 扫描帽特征距离线性偏差的正确度结果

实验组扫描模型1和模型2的扫描帽特征距离线性偏差正确度结果均优于对照组，且差异具有统计学意义 ($P<0.001$)。实验组内和对照组内的线性偏差均值随替代体的增加而上升，差异均具有统计学意义 ($P<0.001$) (表2)。

表 2 扫描帽特征距离线性偏差的正确度结果

Tab 2 Trueness results of linear deviation in feature distances for scan bodies μm , $n=150$

组别	模型1	模型2	Z值	P值
实验组	29.65±18.83	46.03±29.37	-5.433	<0.001
对照组	83.21±59.95	99.20±81.09	-18.077	<0.001
Z值	-8.843	-8.873		
P值	<0.001	<0.001		

2.1.3 扫描帽特征轴线角度偏差的正确度结果

实验组扫描模型1和模型2获得扫描帽角度偏差正确度结果均优于对照组，且差异均具有统计学意义 ($P<0.001$)。对照组的角度偏差均值随替代体的增加而上升，其差异具有统计学意义 ($P<0.05$)；而实验组扫描模型1和模型2的角度偏差均值差异无统计学意义 ($P=0.836$) (表3)。

2.2 扫描帽三维形态偏差的精密度结果

实验组扫描模型1和模型2获得扫描帽三维形态偏差的精密度结果优于对照组，且差异均具有统计学意义 ($P<0.001$)。实验组扫描模型1和模型2的三维形态偏差精密度结果差异具有统计学意义 ($P<0.001$)，而对照组扫描模型1和模型2的结果差异无统计学意义 (表4、图4)。

表 3 扫描帽特征轴线角度偏差的正确度结果

Tab 3 Trueness results of angular deviation in scan abutment feature axes $^{\circ}$, $n=150$

组别	模型1	模型2	Z值	P值
实验组	0.31±0.19	0.34±0.25	-0.208	0.836
对照组	0.49±0.37	0.61±0.50	-1.967	<0.05
Z值	-4.020	-6.703		
P值	<0.001	<0.001		

表 4 扫描帽三维形态偏差的精密度结果

Tab 4 Precision results for the 3D shape deviation of the scan bodies μm , $n=45$

组别	模型1	模型2	Z值	P值
实验组	3.10±0.71	4.47±1.58	-5.306	<0.001
对照组	41.83±15.09	39.81±13.66	-0.545	0.586
Z值	-8.171	-8.171		
P值	<0.001	<0.001		

3 讨论

准确复制种植体三维位置的印模对于获得种植修复体的被动就位和长期稳定至关重要，目前关于无牙颌种植数字化印模的精确性存在着争议。为填补国内在无牙颌种植口外扫描技术领域的空白，课题组自主研发出基于四目立体摄影技术的种植口外扫描系统，并与口内扫描系统进行对比，对该系统应用于无牙颌种植数字化印模的精确性进行初步评估，以期为临床应用提供参考。

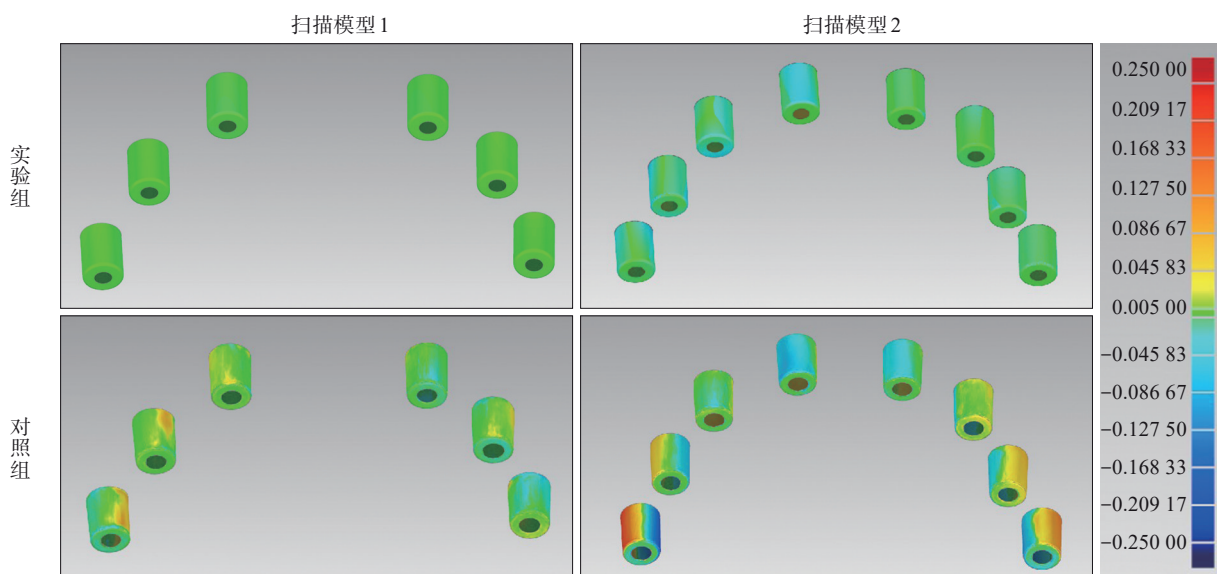


图 4 实验组和对照组扫描模型1和模型2的三维偏差精密度分析色阶样图

Fig 4 Precision analysis color map for 3D deviation of scan models 1 and 2 in the experimental and control groups

根据国际标准化组织出台的ISO 5725-1:1994精度测量标准和GB/T 6379.1-2004 DIN 66350-13测量标准,精度用于描述测量值和真值的接近程度,反映系统及随机误差的总和^[14],包括正确度和精密度。正确度指由大量测试结果得到的平均数与参考值间的接近程度,表示测量结果中系统误差的大小;精密度表示测量过程中随机误差的大小,指在规定条件下,多次独立重复测量同一量时,各测量值间的一致程度^[15-16]。正确度和精密度的数值越小,代表所测量仪器的正确度和精密度越高。

基于上述评价指标,有多种方法用于测量全牙弓种植印模的准确性,包括使用光学显微镜或影像学方法进行直接测量,或者使用虚拟数据进行间接测量^[17]。由于牙科实验室扫描仪的准确性(2~10 μm)可与工业三维扫描仪相当^[18],在体外扫描阶段的误差极小,所以本研究中将模型扫描仪获取的数据作为真值,分别将3Shape口内扫描系统和CEMOS口外扫描系统的扫描数据与真值差值进行对比,以明确自研设备在获取全口种植体三维位置的精度。

根据临床和生物力学原则,骨内种植体的最大侧移量为50 μm ^[19],在临床广泛采用的被动就位可接受阈值150 μm ^[20-21]。将实验模型与参考模型的三维数据叠加获得RMS误差是表示虚拟三维偏差的常用方法^[22-23]。对逆向工程软件计算数字模型间的RMS误差,多数学者^[21,24]采用150 μm 作为研究结果的参考。但RMS值和临床上被动就位150 μm 的阈值不是对等的,有学者^[25]通过制作支架并采用显微CT进行测量,发现支架被动就位与RMS值存在相关性,低于62.2 μm 的虚拟RMS误差可以作为实现物理边界低于150 μm 的被动就位。在本实验中,运用基于迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法的“最佳拟合对齐”功能对STL数据进行全局配准,并选取RMS误差作为评价指标,既能直接对CMEOS系统与3Shape系统的总体三维偏差进行评估,又可与先前的相关研究展开横向对比分析。本实验结果显示,CMEOS系统扫描含6枚替代体模型和含8枚替代体模型所导出虚拟扫描帽与参考扫描帽数据间的虚拟三维形态偏差分别为(21.48 \pm 0.60) μm 和(38.84 \pm 0.86) μm ,均低于前述研究中的62.2 μm ,而TRIOS 3系统的虚拟三维形态偏差值分别为(100.26 \pm 5.75) μm 和(124.34 \pm 14.21) μm ,不能满足实际制作修复体与基台间物理间隙低于150 μm 的被动就位。此外,

本研究还显示CMEOS系统的组内三维形态偏差远低于扫描相同数量替代体的TRIOS 3系统,且TRIOS 3系统的组内形态三维偏差随替代体数量改变的差异具有统计学意义,分析原因是口内扫描技术基于图像拼接原理,多次扫描间的数据重复性欠佳,扫描8枚替代体相对于扫描6枚替代体时增加了可识别的特征,但扫描路径并无明显缩短,使得TRIOS 3系统扫描8枚替代体时增加了图像拼接的准确性,并导致组内形态三维偏差低于扫描6枚替代体的结果。

本实验同时采用线性偏差与角度偏差作为评价指标。不仅能够呈现种植口外扫描系统的精度细节,亦有助于全面对比分析2个系统之间的差异,为CMEOS系统自主研发提供具有参考价值的数据支持。目前研究中采用的可接受线性偏差阈值从50到150 μm 不等,角度偏差的阈值则多设定为0.4°^[26-28]。在本实验中,CMEOS系统的线性偏差均值、角度偏差均值和TRIOS 3系统的线性偏差均值都在可接受范围内,而TRIOS 3系统扫描含6枚替代体模型和含8枚替代体模型的角度偏差分别为0.49° \pm 0.37°和0.61° \pm 0.50°,均已超出临床可接受范围。此外,在线性偏差和角度偏差评价中,仅有CMEOS系统的角度偏差随种植数量变化的差异不具有统计学意义。不同于口内扫描基于图像拼接获得三维位置信息的原理,基于SPG技术的CMEOS系统利用四目相机获取不同角度带有特殊排布规律靶标的扫描体图像,通过算法解码靶标并定位扫描体的三维空间方位,能够获得更精确的扫描体间空间方位关系,因此增加扫描体对CMEOS系统的角度偏差均值结果影响较小。

研究^[29]表明,当种植修复超过4个单位时,口内数字化印模的准确性不确定。并且其真实度会随着种植体间距^[30]和扫描范围^[31]的增加呈下降趋势,其中扫描范围为决定性因素^[32]。Pesce等^[32]使用口内三维扫描仪(True Definition)扫描植入4枚种植体的无牙颌模型,其平均线性误差小于30 μm 。Gimenez-Gonzalez等^[33]分析口内三维扫描仪(True Definition)扫描植入6枚种植体的无牙颌模型的精度,其线性距离误差为5.38~26.97 μm ,角度误差为0.16°~0.43°。本实验中对照组模型1和模型2的线性偏差分别为(83.21 \pm 59.95) μm 和(99.20 \pm 81.09) μm ,角度偏差分别为0.49° \pm 0.37°和0.61° \pm 0.50°,与既往研究结果相似。分析原因为口内扫描仪的扫描头较小,同一视野内只能采集一小块图像^[34],由于无牙颌种植模型缺乏特征解剖

形态,系统采用配准算法将多个图片进行拼接的时候会出现误差,拼接次数越多,误差越大。

综上所述,口内三维扫描仪直接在口内获取多牙种植的三维数据时,扫描精度有待提高,尤其是无牙颌种植固定修复时,未来,IOS技术在算法和硬件层面的迭代更新是实现准确获取全牙弓种植印模的关键因素。本研究通过建立体外种植模型,初步验证基于SPG技术的自研种植口外扫描系统获取替代体三维位置信息的精度优于口内扫描系统,同时揭示种植体数目是影响口外扫描系统精度的关键因素。然而,口外扫描技术存在一定局限,口外扫描磨牙区光线差,且易受前牙区扫描杆遮挡,仅能获得种植体坐标数据而缺少软组织数据,需要额外口内扫描获取牙龈软组织,将重建的种植体位置信息与口内软组织形态数据进行整合,才能生成完整的无牙颌种植数字印模^[35]。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Katsoulis J, Takeichi T, Sol Gaviria A, et al. Misfit of implant prostheses and its impact on clinical outcomes. Definition, assessment and a systematic review of the literature[J]. Eur J Oral Implantol, 2017, 10 Suppl 1: 121-138.
- [2] Abduo J, Judge RB. Implications of implant framework misfit: a systematic review of biomechanical sequelae [J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2014, 29(3): 608-621.
- [3] Schmidt A, Wöstmann B, Schlenz MA. Accuracy of digital implant impressions in clinical studies: a systematic review[J]. Clin Oral Implants Res, 2022, 33(6): 573-585.
- [4] Amin S, Weber HP, 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] Morsy N, El Kateb M, Azer A, et al. Fit of zirconia fixed partial dentures fabricated from conventional impressions and digital scans: a systematic review and meta-analysis[J]. J Prosthet Dent, 2023, 130(1): 28-34.
- [6] Siqueira R, Galli M, Chen Z, et al. Intraoral scanning reduces procedure time and improves patient comfort in fixed prosthodontics and implant dentistry: a systematic review[J]. Clin Oral Investig, 2021, 25(12): 6517-6531.
- [7] Carneiro Pereira AL, Medeiros VR, Da Fonte Porto Carreiro A. Influence of implant position on the accuracy of intraoral scanning in fully edentulous arches: a systematic review[J]. J Prosthet Dent, 2021, 126(6): 749-755.
- [8] Kattadiyil MT, Mursic Z, Alrumaih H, et al. Intraoral scanning of hard and soft tissues for partial removable dental prosthesis fabrication[J]. J Prosthet Dent, 2014, 112(3): 444-448.
- [9] 孙玉春, 孙儒, 邓珂慧, 等. 全口义齿数字化修复技术的研发和应用进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2018, 53(1): 60-65.
Sun YC, Sun R, Deng KH, et al. Research and development of digital design and fabrication of complete denture[J]. Chin J Stomatol, 2018, 53(1): 60-65.
- [10] Revilla-León M, Att W, Özcan M, et al. Comparison of conventional, photogrammetry, and intraoral scanning accuracy of complete-arch implant impression procedures evaluated with a coordinate measuring machine [J]. J Prosthet Dent, 2021, 125(3): 470-478.
- [11] Gómez-Polo M, Gómez-Polo C, Del Río J, et al. Stereophotogrammetric impression making for polyoxymethylene, milled immediate partial fixed dental prostheses [J]. J Prosthet Dent, 2018, 119(4): 506-510.
- [12] 朱洁莹, 赵克, 顾新华. 无牙颌种植修复患者应用口内数字化印模准确性研究进展[J]. 浙江大学学报(医学版), 2024, 53(5): 569-577.
Zhu JY, Zhao K, Gu XH. Research progress on accuracy of intraoral digital impressions for implant-supported prostheses in edentulous jaw[J]. J Zhejiang Univ (Med Sci), 2024, 53(5): 569-577.
- [13] Revilla-León M, Rubenstein J, Methani MM, et al. True-ness and precision of complete-arch photogrammetry implant scanning assessed with a coordinate-measuring machine[J]. J Prosthet Dent, 2023, 129(1): 160-165.
- [14] 王勇, 赵一姣, 司燕. 与三维测量有关的名词浅析[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2009, 16(2): 111-113.
Wang Y, Zhao YJ, Si Y. A brief analysis of terms related to 3D measurement[J]. Chin J Orthod, 2009, 16(2): 111-113.
- [15] Zimmermann M, Mehl A, Mörmann WH, et al. Intraoral scanning systems-a current overview[J]. Int J Comput Dent, 2015, 18(2): 101-129.
- [16] Renne W, Ludlow M, Fryml J, et al. Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners: an *in vitro* analysis based on 3-dimensional comparisons[J]. J Prosthet Dent, 2017,

- 118(1): 36-42.
- [17] Liu M, Fu XJ, Lai HC, et al. Accuracy of traditional open-tray impression, stereophotogrammetry, and intraoral scanning with prefabricated aids for implant-supported complete arch prostheses with different implant distributions: an *in vitro* study[J]. J Prosthet Dent, 2024, 132(3): 602.e1-602.e9.
- [18] Sanda M, Miyoshi K, Baba K. Trueness and precision of digital implant impressions by intraoral scanners: a literature review[J]. Int J Implant Dent, 2021, 7(1): 97.
- [19] Kim Y, Oh TJ, Misch CE, et al. Occlusal considerations in implant therapy: clinical guidelines with biomechanical rationale[J]. Clin Oral Implants Res, 2005, 16(1): 26-35.
- [20] Pan Y, Tsoi JKH, Lam WY, et al. Improving intraoral implant scanning with a novel auxiliary device: an *in-vitro* study[J]. Clin Oral Implants Res, 2021, 32(12): 1466-1473.
- [21] Zhang YJ, Qian SJ, Lai HC, et al. Accuracy of photogrammetric imaging versus conventional impressions for complete arch implant-supported fixed dental prostheses: a comparative clinical study[J]. J Prosthet Dent, 2023, 130(2): 212-218.
- [22] Azevedo L, Marques T, Karasan D, et al. Effect of splinting scan bodies on the trueness of complete arch digital implant scans with 5 different intraoral scanners[J]. J Prosthet Dent, 2024, 132(1): 204-210.
- [23] Dede DÖ, Çakmak G, Donmez MB, et al. Effect of analysis software program on measured deviations in complete arch, implant-supported framework scans[J]. J Prosthet Dent, 2024, 132(1): 211-218.
- [24] Button H, Kojs JC, Barmak AB, et al. Scanning accuracy and scanning area discrepancies of intraoral digital scans acquired at varying scanning distances and angulations among 4 different intraoral scanners[J]. J Prosthet Dent, 2024, 132(5): 1044-1060.
- [25] Fu XJ, Liu M, Shi JY, et al. Comparison of different intraoral scanners with prefabricated aid on accuracy and framework passive fit of digital complete-arch implant impression: an *in vitro* study[J]. Clin Oral Implants Res, 2025, 36(1): 17-27.
- [26] Ahmed S, Hawsah A, Rustom R, et al. Digital impressions versus conventional impressions in prosthodontics: a systematic review[J]. Cureus, 2024, 16(1): e51537.
- [27] Di Fiore A, Meneghello R, Graiff L, et al. Full arch digital scanning systems performances for implant-supported fixed dental prostheses: a comparative study of 8 intraoral scanners[J]. J Prosthodont Res, 2019, 63(4): 396-403.
- [28] Cheng J, Zhang H, Liu H, et al. Accuracy of edentulous full-arch implant impression: an *in vitro* comparison between conventional impression, intraoral scan with and without splinting, and photogrammetry[J]. Clin Oral Implants Res, 2024, 35(5): 560-572.
- [29] Revilla-León M, Gómez-Polo M, Kojs JC. A guide for selecting the intraoral scan extension when fabricating tooth- and implant-supported fixed dental prostheses[J]. J Esthet Restor Dent, 2024, 36(1): 85-93.
- [30] Thanasisuebwong P, Kulchotirat T, Anunmana C. Effects of inter-implant distance on the accuracy of intraoral scanner: an *in vitro* study[J]. J Adv Prosthodont, 2021, 13(2): 107-116.
- [31] Lyu M, Di P, Lin Y, et al. Accuracy of impressions for multiple implants: a comparative study of digital and conventional techniques[J]. J Prosthet Dent, 2022, 128(5): 1017-1023.
- [32] Pesce P, Pera F, Setti P, et al. Precision and accuracy of a digital impression scanner in full-arch implant rehabilitation[J]. Int J Prosthodont, 2018, 31(2): 171-175.
- [33] Gimenez-Gonzalez B, Hassan B, Özcan M, et al. An *in vitro* study of factors influencing the performance of digital intraoral impressions operating on active wavefront sampling technology with multiple implants in the edentulous maxilla[J]. J Prosthodont, 2017, 26(8): 650-655.
- [34] Marghalani A, Weber HP, Finkelman M, et al. Digital versus conventional implant impressions for partially edentulous arches: an evaluation of accuracy[J]. J Prosthet Dent, 2018, 119(4): 574-579.
- [35] Stuani VT, Ferreira R, Manfredi GGP, et al. Photogrammetry as an alternative for acquiring digital dental models: a proof of concept[J]. Med Hypotheses, 2019, 128: 43-49.

(本文编辑 杜冰)