

• 专题研究:数智口腔 •

## 三种无牙颌种植口扫取模方法在两种口内扫描仪中的精确度比较研究

杨胜涛<sup>1</sup>, 叶梁煜<sup>1</sup>, 张宸溢<sup>1</sup>, 岳莉<sup>1</sup>, 袁泉<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>口腔疾病防治全国重点实验室, 国家口腔医学中心, 国家口腔疾病临床医学研究中心, 四川大学华西口腔医院口腔修复工艺科, <sup>2</sup>口腔种植科, 四川 成都 610041

**[摘要]** 目的: 比较3种无牙颌种植口扫取模方法分别在TRIOS 3和Aoralscan 3两种口内扫描仪中的精确度。方法: 构建带有6个多基基台水平扫描杆的标准上颌无牙颌种植模型, 将扫描杆从右上颌到左上颌依次编号为1~6号, 使用桌面扫描仪对标准模型进行扫描作为参考组数据。分别使用TRIOS 3和Aoralscan 3扫描仪对标准模型进行扫描作为测试组数据, 每个口内扫描仪分别采用3种取模方法: ①不添加扫描辅助装置(无装置组); ②添加扫描辅助装置但不进行校正(无校正组); ③添加扫描辅助装置并进行校正(校正组), 每种取模方法重复10次。将口内扫描仪获得的扫描数据通过编号为1和2的两个扫描杆匹配到参考组数据上, 以模拟临床的单螺丝测试。分别针对每个扫描杆, 计算匹配后的3种测试组口内扫描模型数据和参考组模型数据基台中心点之间的距离, 作为精确度, 同时计算每个测试组10个扫描数据中每两个数据基台中心点之间的距离, 作为精密度, 以比较这3种取模方法的精确度和精密度。结果: 在远离匹配区域的扫描杆4、5、6中, 无论是TRIOS 3扫描, 还是Aoralscan 3扫描, 添加辅助装置组(TRIOS 3组平均精确度为272.32  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精确度为240.00  $\mu\text{m}$ )都比无装置组(TRIOS 3组平均精确度为606.77  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精确度为413.78  $\mu\text{m}$ )精确度更高( $P < 0.05$ ), 且校正过程可以在无装置组基础上进一步提高扫描仪的扫描精确度( $P < 0.05$ ), TRIOS 3组校正后精确度平均提高70.51%, Aoralscan 3组校正后精确度平均提高28.00%; 同时添加辅助装置组(TRIOS 3组平均精密度为75.60  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精密度为69.91  $\mu\text{m}$ )和校正组(TRIOS 3组平均精密度为74.36  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精密度为79.42  $\mu\text{m}$ )都比无辅助装置组(TRIOS 3组平均精密度487.75  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精密度160.74  $\mu\text{m}$ )具有更好的精密度( $P < 0.05$ ), 但这两种方法的精密度之间差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。结论: 通过添加扫描辅助校正装置并进行扫描数据校正, 可以有效提高无牙颌种植口扫取模的精确度。

**[关键词]** 无牙颌种植; 口扫取模; 辅助装置; 印模校正

**[中图分类号]** R783

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1007-4368(2025)12-1689-10

**doi:** 10.7655/NYDXBNSN250036

### Accuracy comparison of 3 complete arch implant impression techniques in 2 different intraoral scanners

YANG Shengtao<sup>1</sup>, YE Liangyu<sup>1</sup>, ZHANG Chenyi<sup>1</sup>, YUE Li<sup>1</sup>, YUAN Quan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Oral Diseases, National Center for Stomatology, National Clinical Research Center for Oral Diseases, Department of Dental Technology, <sup>2</sup>Department of Oral Implantology, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

**[Abstract]** **Objective:** To compare the accuracy of three intraoral scanner-based complete arch implant impression techniques using TRIOS 3 and Aoralscan 3 intraoral scanners. **Methods:** A standard edentulous maxillary implant model with 6 screw-retained abutment-level scan bodies was constructed. The scan bodies were numbered from 1 to 6, from the right molar to the left molar area. A control group was generated by scanning the implant model using a desktop scanner. Three intraoral scanner-based scanning techniques were tested: without any scan aids, with scan aids but without calibration, and with scan aids and perform calibration. The tests were performed on 2 intraoral scanners: TRIOS 3 and Aoralscan 3. Each technique was repeated 10 times on each scanner. Scan bodies in

**[基金项目]** 四川大学2025年度大学生创新训练计划(S202510610524)

\*通信作者(Corresponding author), E-mail: yuanquan@scu.edu.cn (ORCID: 0000-0002-2836-1081)

the tested groups were superimposed onto the control group using scan bodies #1 and #2 as references to simulate the single-screw test. For each scan body, the distance between the centers of the screw-retained abutments in the test and control groups was measured to calculate trueness. The distance between the centers of the screw-retained abutments in each pair of scans within each test group was also measured to calculate precision. Trueness and precision of the 3 tested impression techniques were compared. **Results:** In both tested scanners, the trueness of the scanning group with scan aids (272.32  $\mu\text{m}$  for TRIOS 3; 240.00  $\mu\text{m}$  for Aoralscan 3) was higher than that of the group without any scan aids (606.77  $\mu\text{m}$  for TRIOS 3; 413.78  $\mu\text{m}$  for Aoralscan 3) (all  $P < 0.05$ ). Furthermore, the calibration process further improved trueness (70.51% improvement for TRIOS 3; 28.00 % improvement for Aoralscan 3). For precision, the scanning group with scan aids (75.60  $\mu\text{m}$  for TRIOS 3; 69.91  $\mu\text{m}$  for Aoralscan 3) and the group with calibration (74.36  $\mu\text{m}$  for TRIOS 3; 79.42  $\mu\text{m}$  for Aoralscan 3) outperformed the group without any scan aids (487.75  $\mu\text{m}$  for TRIOS 3; 160.74  $\mu\text{m}$  for Aoralscan 3) (all  $P < 0.05$ ). However, there was no statistically significant difference between the scanning group with scan aids and the group with calibration ( $P > 0.05$ ). **Conclusion:** The accuracy of intraoral scanning for full-arch implant impressions can be significantly improved by using scan aids combined with a calibration process.

[Key words] full arch implant surgery; intraoral scan; scan aids; impression calibration

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(12): 1689-1697, 1718]

高精度的印模制取是无牙颌种植固定修复的重要步骤,是无牙颌种植上部修复结构取得被动就位的前提,也是降低相关机械和生物学并发症、维持无牙颌种植修复长期稳定的关键之一<sup>[1-5]</sup>。目前主流的无牙颌种植印模制取技术包括传统的夹板式印模法、基于口外立体摄影测量的数字化取模法及基于口内扫描(简称口扫)技术的数字化取模法等<sup>[6-9]</sup>。传统夹板式印模法精度高、设备依赖性相对较低,目前在临床得到广泛应用,但是也存在椅旁操作时间较长、患者舒适度较低等不足<sup>[10]</sup>。基于口外立体摄影测量的数字化取模法可以获得高精度的无牙颌种植印模,但是该技术对设备依赖性较高,目前难以在临床得到广泛普及<sup>[8,11]</sup>。口扫技术作为目前临床普及较为广泛的数字化印模制取技术,有效简化了传统的取模流程、提高了患者的舒适度,同时可以直接对接后端的数字化设计流程<sup>[10,12]</sup>。但由于口扫仪主要通过数据拼接获得被扫描物体的三维数据,在扫描跨度较长、扫描杆之间缺乏特征明显的解剖标志及黏膜组织反光等无牙颌种植患者特殊的口腔组织条件下,口扫过程中容易累积过大的数据拼接误差,目前难以单纯通过口扫仪和常规扫描杆制取高精度的无牙颌种植印模<sup>[13-15]</sup>。

为了降低无牙颌种植口扫取模过程中的数据拼接误差,多数学者提出了在扫描杆上增加辅助扫描装置的方案,通过在传统扫描杆上添加表面带有易于扫描和识别特征的辅助装置,可以有效促进口扫过程中的数据识别和拼接<sup>[16-20]</sup>。但是这些装置设计无法从根源上规避口扫过程中的数据拼接误差

问题,当扫描路径过长时,累积的误差仍然可能大于临床可接受的范围。近年来,有学者提出了借助辅助校正装置对无牙颌种植口扫数据进行校正的新方案<sup>[15,21-22]</sup>。首先设计和制作表面具有特殊特征的辅助校正装置,并利用高精度的扫描设备对装置进行扫描以获得用于校正的参考数据。然后将装置固定于口内扫描杆上进行口扫,获得包括扫描杆和辅助校正装置的复合数据,接着将该复合数据进行虚拟分割,保证分割后的每个数据片段包括一个扫描杆及对应的辅助校正装置部分,将分割后的数据片段匹配到之前利用高精度扫描仪扫描获得的校正装置参考数据上,获得校正以后的无牙颌种植口扫数据。该技术通过数据分割和重新匹配的过程,可以将口扫过程中累积的误差进行分解,实现对无牙颌种植口扫数据的“校正”<sup>[21]</sup>。Li等<sup>[15]</sup>通过体外模型研究发现在虚拟单螺丝测试中,校正后的口扫数据相比传统夹板式取模正确度提高了36.7%,精密度提高了65  $\mu\text{m}$ ,展现了良好的临床应用前景。然而,目前的辅助校正装置的标准设计形式尚未统一,同时尚未有研究探究其不同口扫仪中的精确度。

综上,本研究提出了一种新的辅助校正装置设计,并在两种口内扫描仪中探究其精确度(包括正确度和精密度),以探索基于辅助校正装置的无牙颌种植口扫取模新方案。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

上颌无牙颌树脂模型(带仿真牙龈无牙颌树脂

模型,河南安阳瓦岗寨牙科材料公司);模拟种植体(BLT)、无牙颌螺丝固位基台(screw-retained abutment, SRA基台,直径4.6 mm)、无牙颌口扫扫描杆(Mono Scanbody,直径4.6 mm)(士卓曼公司,瑞士);桌面扫描仪(DS-MIX,杭州先临三维);TRIOS 3口内扫描仪(3Shape公司,丹麦);Aoralscan 3口内扫描仪、3D打印机(AccuFab-D1s)、3D打印树脂模型材料(DM15)(杭州先临三维);手捏硅橡胶(Putty, 3M ESPE公司,美国);Blender 3.6软件;DentalCAD 3.2软件。

## 1.2 方法

### 1.2.1 标准模型的构建

在上颌无牙颌树脂模型对应16、14、12、22、24、26牙的位点植入6颗模拟种植体,其中12、22牙位种植体直径3.3 mm,长度12 mm;14、24牙位种植体直径为4.1 mm,长度12 mm;16、26牙位种植体直径为4.8 mm,长度12 mm。所有种植体均为非倾斜植入。在所有种植体上安装对应的无牙颌螺丝固位基台,安装扭矩为35 N/cm,获得植入了6颗种植体的标准体外无牙颌上颌种植模型。本研究的整体设计如图1所示。

### 1.2.2 参考组数据的获取

在螺丝固位基台上安装无牙颌口扫扫描杆,将6个扫描杆按照16~26牙位的顺序从右向左依次编号为1~6号,利用桌面扫描仪对安装扫描杆后的模型进行扫描,将扫描数据导出为标准镶嵌语言(standard tessellation language, STL)格式,作为参考组数据,扫描之前按照厂家推荐的标准流程对桌面扫描仪进行校正。

### 1.2.3 辅助校正装置的设计和制作

利用开源三维设计软件Blender设计表面具有圆形不规则特征的辅助校正装置,装置中间进行“C”形开孔,允许6颗种植扫描杆从开孔处穿出,装置厚度设置为3 mm以保证一定的强度。利用齿科3D打印机对设计的辅助校正装置进行打印,按照厂家推荐的标准流程对打印的装置进行后处理。利用高精度的齿科桌面扫描仪对后处理结束后的装置进行扫描并导出为STL格式的数据,作为后续口扫数据校正的参考数据。

### 1.2.4 测试组数据获取

#### 1.2.4.1 无装置组

使用两种口内扫描仪TRIOS 3(3Shape)和Aoralscan 3(先临三维)对安装扫描杆后的标准模型进行扫描,扫描过程中不添加任何辅助装置,所有扫描操作均由具有6年口扫使用经验的操作人员进行。扫描之前按照口内扫描仪厂家推荐的标准流程对设备进行校正,扫描环境光源、温度、湿度均按照厂家推荐设定。两种扫描仪的扫描路径均为从扫描杆编号为1的16牙位开始,按照扫描杆编号顺序,依次从1~6号进行扫描,先扫描殆面,从编号为6的扫描杆处转到颊侧扫描,再从编号为1的扫描杆处转到腭侧进行扫描。扫描后对数据进行检查,对扫描不全的地方进行少量补扫。每个口扫仪扫描10次,将得到的数据以STL格式导出。

#### 1.2.4.2 无校正组

利用手捏硅橡胶将打印的辅助校正装置固定

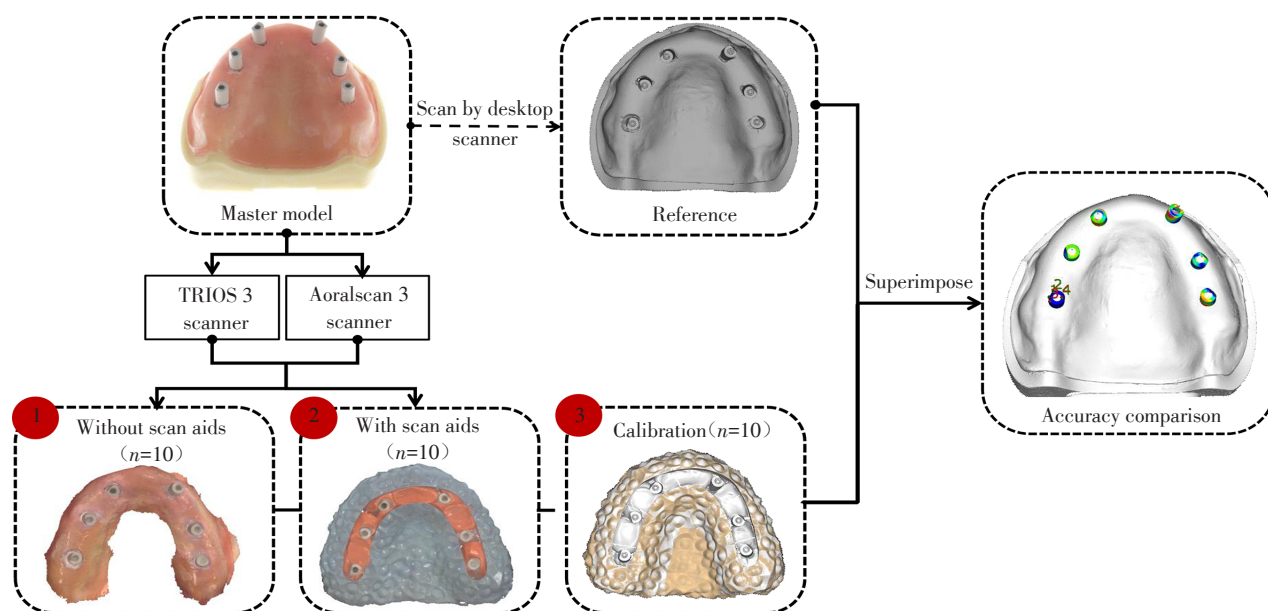


图1 本研究的整体设计流程图

Figure 1 The overall design flowchart of this study

到构建的标准模型上,确保6个扫描杆均从辅助装置的“C”形开孔处穿出,且扫描杆的斜面特征不被硅橡胶所遮挡。待硅橡胶固化后,利用两种口内扫描仪对添加了辅助校正装置的模型进行扫描,扫描环境及扫描路径与无装置组一致,扫描前先对口内扫描仪进行再次校正,每个扫描仪扫描10次,将获得的扫描数据存储为STL格式。

### 1.2.4.3 校正组

数据的校正过程如图2所示。首先将无校正组中的20个扫描数据导入齿科3D设计软件(DentalCAD 3.2, Exocad)中,利用软件的“编辑网格”功能,对扫描的整体数据进行编辑,将扫描数据虚拟分割

为6个片段,每个片段包含1个扫描杆及一部分的辅助校正装置。然后导入利用桌面扫描仪扫描的辅助校正装置数据,使用软件的“匹配网格”功能,借助辅助校正装置表面的不规则特征,将分割后的扫描数据片段分别匹配到辅助校正装置的桌面扫描数据上。匹配过程分为3步:①在分割的数据片段和装置扫描数据颊舌侧选择3~4个共同的特征点;②执行软件的“匹配网格”功能,将分割的数据片段初步匹配到装置扫描数据上;③执行软件的“最佳匹配”功能,实现两个数据的最佳匹配。重复以上步骤,完成6个数据片段与装置扫描数据的匹配。依次完成20个数据的校正,将校正后的数据存

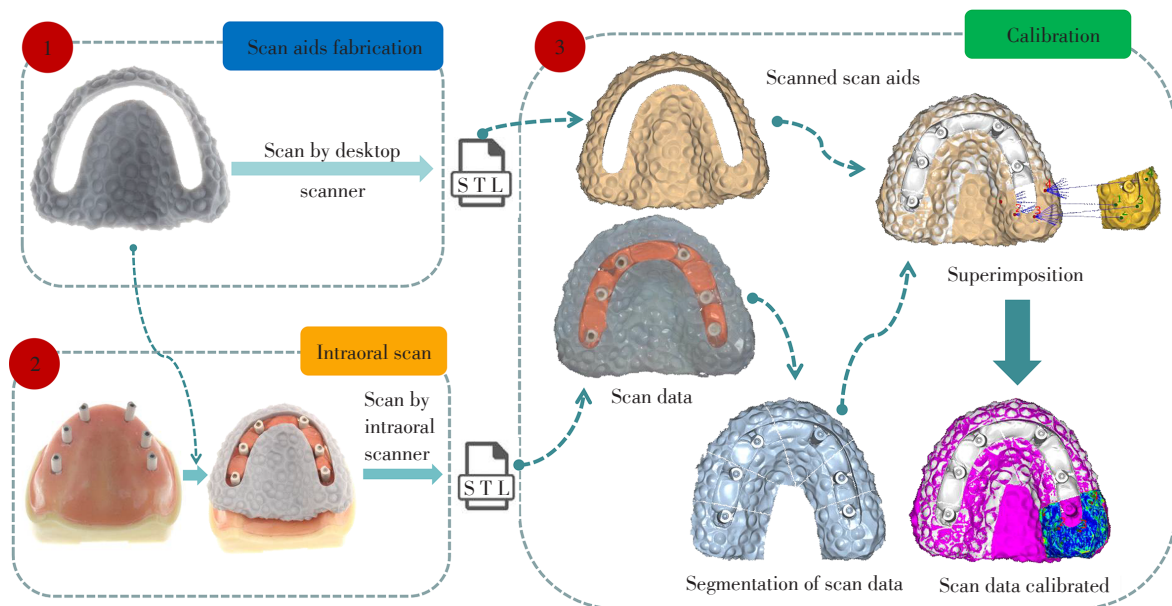


图2 校正组整体流程

Figure 2 Calibration process

储为STL格式,作为校正组。

## 1.2.5 精确度测量

### 1.2.5.1 测试组数据与参考组数据匹配

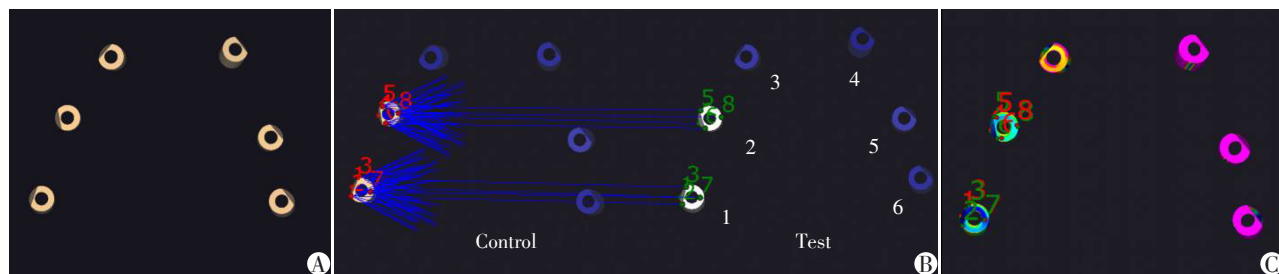
数据匹配过程如图3所示。在齿科设计软件(DentalCAD 3.2, Exocad)中选择对应的无牙颌扫描杆数据库,将扫描杆匹配到参考组及测试组扫描数据的扫描杆上,此步骤可以将参考组及每个测试组数据简化为6个扫描杆(图3A),便于后续数据分析。将简化后的所有测试组数据通过编号为1号和2号的两个扫描杆匹配到简化后的参考组扫描杆上(图3B),并执行最佳匹配(图3C),以虚拟模拟临床上的单螺丝测试实验。将完成匹配后的所有测试组及参考组数据以STL格式导出。

### 1.2.5.2 正确度测量分析

将匹配后的参考组及测试组数据导入开源软件(Blender)中,利用Python代码自动计算所有测试组1~6号扫描杆底部中心(对应螺丝固位基台的中心)与对应编号的参考组扫描杆底部中心间的3D距离,并按照扫描杆的编号分别进行输出,获得每个扫描杆上的每个测试组与参考组数据之间的10个距离,该距离代表不同取模方法的正确度。

### 1.2.5.3 精密度测量分析

将匹配后的测试组数据导入开源软件(Blender)中,针对1~6号扫描杆,利用Python代码自动计算每个测试组重复的1~10次扫描数据中,每2次扫描数据对应的扫描杆底部中心(对应螺丝固位基台的中



A: Simplified scan data. B: Superimposition of the test and control group using scanbody #1 and #2. C: Best-fit completed between the test group and control group. The red and green points represent the selected points for superimposition.

图3 测试组及参考组数据匹配流程

Figure 3 Superimposition of the test group and control group

心)间的3D距离,并按照测试组类型进行输出,每个测试组每个扫描杆获得45个计算数据,该数据代表不同测试组取模方法的精密度。

### 1.3 统计学方法

使用统计学软件(GraphPad Prism, 9.0)计算每种取模方法在每个扫描杆上的正确度和精密度,采用均值±标准差( $\bar{x} \pm s$ )对数据进行统计描述,同时计算正确度和精密度的最大值和最小值。对数据的正态性和方差齐性进行验证。使用单因素方差分析对每个口扫仪的3种取模方法的正确度和精密度差异,并用Tukey HSD法进行两两比较,确定检验水准为0.05。

## 2 结果

3种无牙颌种植口扫取模方法在两种口内扫描仪中的正确度和精密度统计如表1和图4、5所示。对于正确度而言,在远离匹配区域的扫描杆4、5、6中,无论是TRIOS 3扫描,还是Aoralscan 3扫描,添加辅助装置组(TRIOS 3组平均正确度为272.32  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均正确度为240.00  $\mu\text{m}$ )都比无装置组(TRIOS 3组平均正确度为606.77  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均正确度为413.78  $\mu\text{m}$ )正确度更高( $P$ 均 $<0.05$ ),且校正过程可以在无装置组基础上进一步提高扫描仪的扫描正确度( $P < 0.05$ ),TRIOS 3组校正后正确度平均提高70.51%, Aoralscan 3组校正后正确度平均提高28.00%,这种趋势在两种口内扫描仪中均一致。在远离匹配扫描杆(扫描杆1和扫描杆2)的末端扫描杆6中,TRIOS 3无装置组正确度均值为745.17  $\mu\text{m}$ , TRIOS 3无校正组正确度均值为348.69  $\mu\text{m}$ ,相比无装置组正确度提升了53.21%,TRIOS 3校正组正确度均值为99.75  $\mu\text{m}$ ,相比无校正组正确度进一步提升了71.39%。对于Aoralscan 3口扫仪的末端扫描杆6中,无校正组正确度为258.67  $\mu\text{m}$ ,相比无装置组(494.51  $\mu\text{m}$ )提升了47.81%,而校正组(163.86  $\mu\text{m}$ )在

无校正组的基础上可以将正确度进一步提高36.51%。

对于精密度而言,在扫描杆4~6中,无校正组和校正组相比无装置组均具有更好的结果,添加辅助装置组(TRIOS 3组平均精密度为75.60  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精密度为69.91  $\mu\text{m}$ )和校正组(TRIOS 3组平均精密度为74.36  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精密度为79.42  $\mu\text{m}$ )都比无辅助装置组(TRIOS 3组平均精密度487.75  $\mu\text{m}$ , Aoralscan 3组平均精密度160.74  $\mu\text{m}$ )具有更好的精密度( $P < 0.05$ ),但这两种方法的精密度之间差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),这种趋势在两种口扫仪中均一致。在远离匹配扫描杆(扫描杆1和扫描杆2)的末端扫描杆6中,TRIOS 3无校正组(96.36  $\mu\text{m}$ )和校正组(96.11  $\mu\text{m}$ )相比无装置组(630.54  $\mu\text{m}$ )精密度提升了约85%, Aoralscan 3无校正组(88.67  $\mu\text{m}$ )和校正组(96.48  $\mu\text{m}$ )相比无装置组(196.60  $\mu\text{m}$ )精密度提升了约53%。

## 3 讨论

本研究基于TRIOS 3和Aoralscan 3两种口内扫描仪,对不添加辅助装置、添加辅助装置但不进行校正、添加辅助装置并进行校正3种无牙颌种植口扫取模方法的精确度进行了对比。研究结果显示无论是在TRIOS 3还是在Aoralscan 3扫描仪中,在远离匹配扫描杆的扫描杆4~6上,3种取模方法的正确度之间存在明显的统计学差异,添加辅助装置并进行校正组展现了最佳正确度,同时相比无装置组,添加辅助装置组及校正组均表现出了更好的精密度,因此拒绝了研究假设。

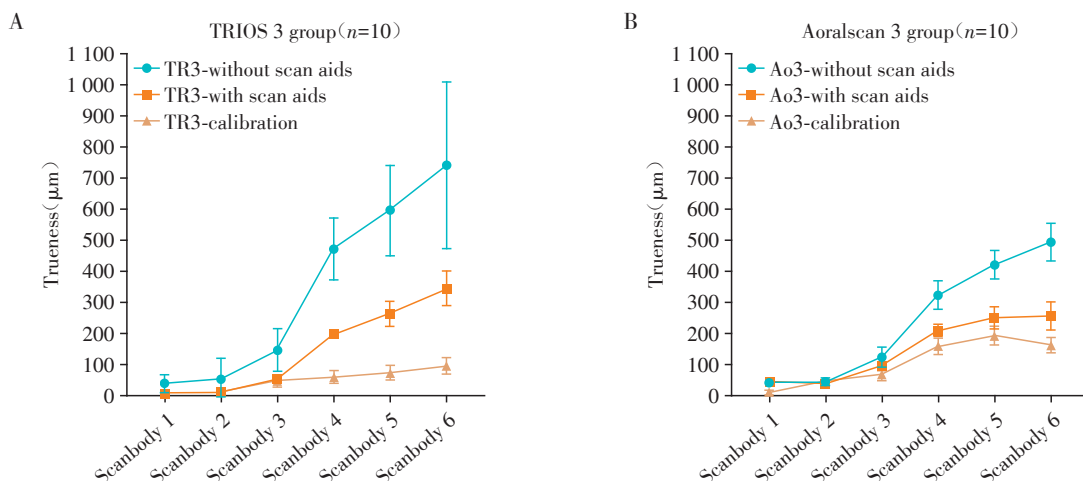
根据ISO标准,精确度包括了正确度和精密度<sup>[6,23]</sup>。正确度表示测试组数据和真实参考数据之间的差异,在本研究中为测试组和参考对照组扫描杆底部中心之间的距离。精密度为同一测试组不同重复测量值之间的差异,表征了测试方法的稳定性或连

表1 针对每个扫描杆和每种口内扫描仪,3种取模方法的正确度和精密度比较

Table 1 For each scanbody, comparison of trueness and precision of the 3 tested impression techniques in the 2 intraoral scanners (μm)

Scanbody	Trueness(n=10)				Precision(n=10)			
	Mean	SD	Max	Min	Mean	SD	Max	Min
1								
TR3-without scan aids	43.09 <sup>a</sup>	29.22	115.27	6.24	59.62 <sup>a</sup>	42.21	147.68	4.48
TR3-with scan aids	11.04 <sup>b</sup>	7.93	22.68	2.19	11.53 <sup>b</sup>	6.54	23.36	2.09
TR3-calibration	11.32 <sup>b</sup>	5.53	22.22	3.24	14.70 <sup>b</sup>	8.80	34.68	2.79
Ao3-without scan aids	42.62 <sup>a</sup>	11.41	58.11	26.64	15.71 <sup>a</sup>	8.49	32.93	2.42
Ao3-with scan aids	44.61 <sup>a</sup>	8.35	58.76	30.18	10.65 <sup>b</sup>	6.77	28.81	0.93
Ao3-calibration	12.67 <sup>b</sup>	6.46	26.33	4.28	14.89 <sup>a</sup>	6.36	30.53	5.24
2								
TR3-without scan aids	57.10 <sup>a</sup>	68.65	228.55	4.56	94.97 <sup>a</sup>	86.15	308.36	7.19
TR3-with scan aids	15.41 <sup>b</sup>	5.72	23.37	7.98	13.54 <sup>b</sup>	7.12	27.84	2.69
TR3-calibration	18.87 <sup>b</sup>	7.81	33.14	7.08	19.24 <sup>b</sup>	9.66	46.90	5.26
Ao3-without scan aids	46.41	12.20	65.20	28.77	18.95 <sup>a</sup>	9.08	40.89	4.90
Ao3-with scan aids	38.97	5.20	49.23	30.66	10.70 <sup>b</sup>	5.85	26.87	1.60
Ao3-calibration	48.70	12.20	64.93	31.89	18.41 <sup>a</sup>	8.60	37.02	4.24
3								
TR3-without scan aids	150.45 <sup>a</sup>	69.63	271.23	48.69	199.39 <sup>a</sup>	123.89	451.32	27.13
TR3-with scan aids	57.64 <sup>b</sup>	8.17	71.97	47.12	42.55 <sup>b</sup>	19.97	96.42	8.69
TR3-calibration	52.40 <sup>b</sup>	19.16	88.58	24.52	43.09 <sup>b</sup>	17.37	77.03	6.36
Ao3-without scan aids	124.60 <sup>a</sup>	32.03	195.22	82.58	49.89 <sup>a</sup>	23.21	115.39	12.05
Ao3-with scan aids	96.89 <sup>b</sup>	10.48	109.09	76.64	24.26 <sup>b</sup>	10.44	50.55	5.87
Ao3-calibration	70.01 <sup>c</sup>	20.42	110.58	45.43	47.10 <sup>a</sup>	19.93	96.89	10.63
4								
TR3-without scan aids	475.42 <sup>a</sup>	100.87	673.29	371.52	368.08 <sup>a</sup>	191.68	784.39	32.12
TR3-with scan aids	200.94 <sup>b</sup>	14.72	225.18	188.09	47.20 <sup>b</sup>	22.74	105.16	7.94
TR3-calibration	63.92 <sup>c</sup>	20.85	104.45	39.43	63.15 <sup>b</sup>	26.96	132.67	7.21
Ao3-without scan aids	324.45 <sup>a</sup>	46.11	410.04	278.02	122.94 <sup>a</sup>	49.70	259.41	35.49
Ao3-with scan aids	210.84 <sup>b</sup>	19.51	240.93	174.99	50.81 <sup>b</sup>	20.34	104.67	13.73
Ao3-calibration	160.73 <sup>c</sup>	27.08	220.45	132.91	55.64 <sup>b</sup>	29.53	138.98	15.30
5								
TR3-without scan aids	599.72 <sup>a</sup>	145.55	973.49	464.27	464.64 <sup>a</sup>	247.86	1 000.10	86.89
TR3-with scan aids	267.34 <sup>b</sup>	40.10	315.63	195.09	83.23 <sup>b</sup>	31.72	143.78	27.80
TR3-calibration	77.23 <sup>c</sup>	23.17	120.27	45.87	63.82 <sup>b</sup>	30.00	148.58	11.77
Ao3-without scan aids	422.38 <sup>a</sup>	46.99	533.29	363.70	162.69 <sup>a</sup>	64.33	315.20	27.74
Ao3-with scan aids	251.08 <sup>b</sup>	36.10	315.12	196.89	70.24 <sup>b</sup>	31.34	159.83	19.19
Ao3-calibration	193.81 <sup>c</sup>	30.54	254.13	149.35	86.13 <sup>b</sup>	51.36	199.17	6.14
6								
TR3-without scan aids	745.17 <sup>a</sup>	269.55	1 394.20	423.41	630.54 <sup>a</sup>	333.36	1 386.50	132.85
TR3-with scan aids	348.69 <sup>b</sup>	57.01	434.85	243.77	96.36 <sup>b</sup>	47.90	240.70	17.38
TR3-calibration	99.75 <sup>c</sup>	27.45	153.23	68.13	96.11 <sup>b</sup>	39.25	171.41	22.40
Ao3-without scan aids	494.51 <sup>a</sup>	61.35	600.37	397.64	196.60 <sup>a</sup>	89.43	385.60	50.22
Ao3-with scan aids	258.07 <sup>b</sup>	45.85	326.55	188.74	88.67 <sup>b</sup>	40.08	197.77	22.92
Ao3-calibration	163.86 <sup>c</sup>	25.13	212.97	123.02	96.48 <sup>b</sup>	55.52	220.17	18.74

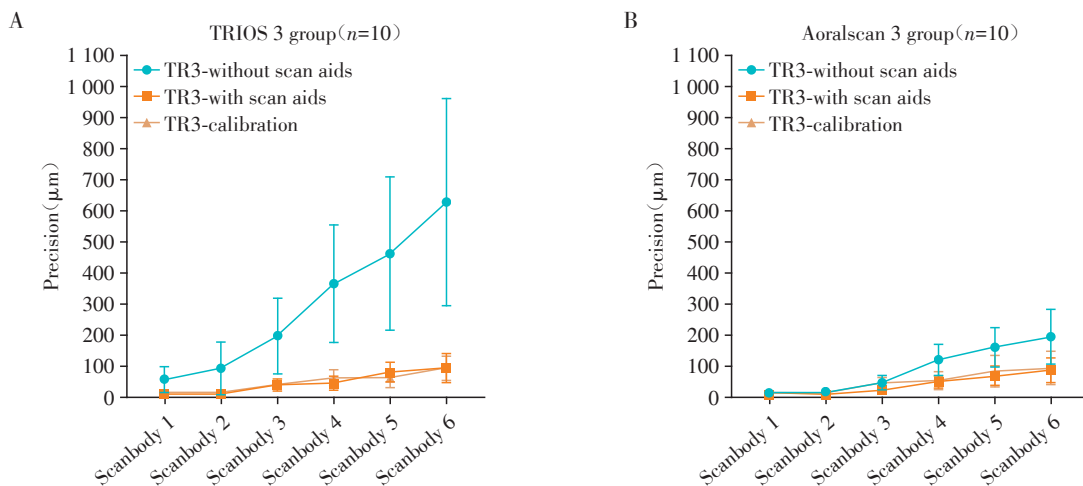
The different lowercase indicates a statistically significant difference between the 3 tested impression techniques (P < 0.05). SD: standard deviation; Min: minimum; Max: maximum. TR3: TRIOS 3 intraoral scanner; Ao3: Aoralscan 3 intraoral scanner.



A: Trueness comparison of the 3 tested impression techniques in the TRIOS 3 group. B: Trueness comparison of the 3 tested impression techniques in the Aoralscan 3 group(n=10).

图4 3种取模方法分别在TRIOS 3、Aoralscan 3组扫描杆1~6上的正确度比较折线图

Figure 4 The line chart comparing the trueness of the 3 tested impression techniques on scanbody #1 to scanbody #6 in the intraoral scanners TRIOS 3 and Aoralscan 3



A: Precision comparison of the 3 tested impression techniques in the TRIOS 3 group. B: Precision comparison of the 3 tested impression techniques in the Aoralscan 3 group(n=10).

图5 3种取模方法分别在TRIOS 3、Aoralscan 3组扫描杆1~6上的精密度比较折线图

Figure 5 The line chart comparing the precision of the 3 tested impression techniques on scanbody #1 to scanbody #6 in the intraoral scanners TRIOS 3 and Aoralscan 3

续性,在本研究中为同一取模方法10组重复测量数据在对应编号扫描杆底部中心之间的45个距离。

目前文献已经证明了口扫仪在三单位固定桥等短跨度的数据扫描中具有良好的精确度<sup>[24-25]</sup>,因此学者提出了将长跨度的无牙颌种植口扫数据分解为短跨度的片段,并通过参考辅助校正装置进行重新匹配拼接的校正方案<sup>[15]</sup>。理论上每个分割后的短跨度数据片段都具有良好的精确度,通过和高精度扫描的辅助装置数据进行拼接,可以将长跨度扫描的无牙颌种植取模过程累积的误差进行分解,

从而获得高精度的印模。Etxaniz等<sup>[21]</sup>设计了可以通过硅橡胶固位在无牙颌扫描杆腭侧或者舌侧的表面带有不规则结构的辅助校正装置,并提出了基于该装置的无牙颌种植口扫数据校正流程,但是并未对其精确度进行研究。Gómez-Polo<sup>[22]</sup>、Roig等<sup>[26]</sup>提出了牙形的辅助校正装置设计,并通过包含12个无牙颌种植固定修复患者的临床研究发现校正后的印模可以取得相比传统印模更好的修复体密合性。Li等<sup>[15]</sup>设计了表面带有不规则特征的“C”形辅助校正装置,并根据种植体的位置对装置进行开

孔,利用硅橡胶将装置固位在扫描杆上,进行辅助扫描和后续扫描数据的校正。在远离匹配扫描杆的末端扫描杆中发现校正后的印模(121.7  $\mu\text{m}$ )与传统夹板式印模(192.2  $\mu\text{m}$ )具有类似的正确度,且校正取模法(104.3  $\mu\text{m}$ )展现了比传统夹板式印模(204.1  $\mu\text{m}$ )更好的精密度。在本研究中,校正取模法在末端扫描杆上取得了最佳的正确度,与Li等<sup>[15]</sup>的研究相一致。

本研究中的辅助校正装置为中间带“C”形预开孔的设计,因此可以直接固位到扫描杆上,省去了在椅旁对装置进行开孔的步骤,可以节约临床时间。同时“C”形预开孔装置可以用金属打印,从而在椅旁重复使用。

本研究发现在两个测试口扫描仪中,无装置组正确度和精密度均最差,这与无牙颌模型扫描杆之间均为模拟牙龈,表面缺乏明显匹配特征有关。添加辅助装置后,可以覆盖牙龈部分,并提供扫描匹配参考点,有效提高扫描精确度。同时相比无校正组,校正组在末端扫描杆中具有更好的正确度。在扫描杆6中,TRIOS 3无校正组正确度为348.69  $\mu\text{m}$ ,而校正组正确度为99.75  $\mu\text{m}$ ,校正后正确度提高了71.39%。对于Aoralscan 3扫描仪的扫描杆6,无校正组正确度为258.07  $\mu\text{m}$ ,而校正组正确度为163.86  $\mu\text{m}$ ,校正后正确度提高了36.51%。提示在长跨度扫描情况下,即使添加了扫描辅助装置,也无法避免扫描仪存在的数据拼接误差问题,可能在末端形成较大的累积误差,而校正过程则可以对累积误差进行分解,取得精确度更高的印模。

目前对于临床上可接受的无牙颌种植印模偏差阈值尚无统一标准,有学者将100  $\mu\text{m}$ 作为参考值<sup>[27]</sup>,在本研究中,校正后的TRIOS 3组偏差<100  $\mu\text{m}$ ,满足临床需求,而Aoralscan 3扫描仪尽管在无装置的情况下表现出了更高的正确度和精密度,但是校正后的偏差>100  $\mu\text{m}$ ,无法满足临床无牙颌种植终印模制取的需求。提示在不同扫描仪中,校正过程起到的效能不同,这可能与不同扫描仪的原理设计有关<sup>[28]</sup>。根据厂家产品说明,TRIOS 3口内扫描仪主要基于超快光学切片技术和共焦显微技术,而Aoralscan 3扫描仪主要基于结构光扫描技术,扫描原理的不同可能导致校正过程在两种口扫描仪中起到的效能不同。同时,扫描头的大小、配套软件的设计也是可能的影响因素。未来需要探索不同辅助校正装置的设计,寻求在不同原理口扫描仪中均具有良好校正效果的装置设计。本研究虽然发现校正过程可以

有效提高无牙颌种植印模获取的精度,但是相比无校正组,校正过程需要进行额外的扫描数据分割和匹配,从而花费更多时间,同时匹配过程具有一定的技术敏感性,需要一定的齿科软件操作经验。未来可以开发配套的校正软件,优化校正步骤和流程,节约操作时间。

综上,本研究发现添加辅助校正装置并进行后期校正可以获得精确度更高的无牙颌种植口扫描印模,结合特定口扫描仪可以用于数字化无牙颌种植印模的制取,但是校正过程在不同口扫描仪中起到的效能大小不同。然而,本研究为体外模型研究,且只针对两种口扫描仪和一种辅助校正装置设计进行了探索,未来需要结合不同口扫描仪及辅助校正装置设计,进行临床体内研究,以明确辅助校正装置在临床无牙颌种植取模中的真实效能,为临床应用无牙颌辅助校正装置提供更多的数据参考。

#### 利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

#### Conflict of Interests:

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### 作者贡献声明:

杨胜涛负责项目构思、方法指导、数据分析、文章撰写;叶梁煜、张宸溢负责实验实施、数据分析、文章撰写;岳莉、袁泉负责项目构思、文稿审阅。

#### Author's Contributions:

YANG Shengtao was responsible for project conception, methodological guidance, data analysis, and article writing; YE Liangyu and ZHANG Chenyi were responsible for experiment implementation, data analysis, and article writing; YUE Li and YUAN Quan were responsible for project conception and manuscript review.

#### [参考文献]

- [1] VANDEWEGHE S, VERVACK V, DIERENS M, et al. Accuracy of digital impressions of multiple dental implants: an *in vitro* study [J]. Clin Oral Implants Res, 2017, 28(6): 648-653
- [2] REIS I N R D, CHAMMA-WEDEMANN C N, SILVA I A O, et al. Clinical outcomes of digital scans versus conventional impressions for implant-supported fixed complete arch prostheses: a systematic review and meta-analysis [J]. J Prosthet Dent, 2023; S0022-3913(23)00640-6
- [3] 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
- [4] FLÜGGE T, VAN DER MEER W J, GONZALEZ B G, et al. The accuracy of different dental impression techniques for implant-supported dental prostheses: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2018, 29(Suppl 16): 374-392
- [5] KRISHNAN V, TONY THOMAS C, SABU I. Management of abutment screw loosening: review of literature and report of a case[J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2014, 14(3): 208-214
- [6] REVILLA-LEÓN M, RUBENSTEIN J, METHANI M M, et al. Trueness and precision of complete-arch photogrammetry implant scanning assessed with a coordinate-measuring machine[J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 129(1): 160-165
- [7] 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
- [8] MA B W, YUE X X, SUN Y J, et al. Accuracy of photogrammetry, intraoral scanning, and conventional impression techniques for complete-arch implant rehabilitation: an *in vitro* comparative study [J]. *BMC Oral Health*, 2021, 21(1): 636
- [9] CHENG J, ZHANG H D, LIU H L, 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
- [10] SIQUEIRA R, GALLI M, CHEN Z 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
- [11] HUSSEIN M O. Photogrammetry technology in implant dentistry: a systematic review[J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 130(3): 318-326
- [12] KUNAVISARUT C, JARANGKUL W, PORNPRASERTSUK-DAMRONGSRI S, et al. Patient-reported outcome measures (PROMs) comparing digital and conventional workflows for treatment with posterior single-unit implant restorations: a randomized controlled trial [J]. *J Dent*, 2022, 117: 103875
- [13] CHEN Y M, ZHAI Z H, WATANABE S, et al. Understanding the effect of scan spans on the accuracy of intraoral and desktop scanners[J]. *J Dent*, 2022, 124: 104220
- [14] REVILLA-LEÓN M, LANIS A, YILMAZ B, et al. Intraoral digital implant scans: Parameters to improve accuracy [J]. *J Prosthodont*, 2023, 32(S2): 150-164
- [15] LI J Y, CHEN Z Z, NAVA P, et al. Calibrated intraoral scan protocol (CISP) for full-arch implant impressions: an *in vitro* comparison to conventional impression, intraoral scan, and intraoral scan with scan-aid [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2024, 26(5): 879-888
- [16] WU H K, CHEN G H, ZHANG Z C, et al. Effect of artificial landmarks of the prefabricated auxiliary devices located at different arch positions on the accuracy of complete-arch edentulous digital implant scanning: an *in vitro* study [J]. *J Dent*, 2024, 140: 104802
- [17] WU H K, CHEN G H, WANG J, et al. Effect of prefabricated auxiliary devices and scanning patterns on the accuracy of complete-arch implant digital impressions [J]. *J Dent*, 2024, 140: 104788
- [18] PARATELLI A, VANIA S, GÓMEZ-POLO C, et al. Techniques to improve the accuracy of complete arch implant intraoral digital scans: a systematic review [J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 129(6): 844-854
- [19] KERNEN F, BRÄNDLE D, WAGENDORF O, et al. Enhancing intraoral scanner accuracy using scan aid for multiple implants in the edentulous arch: an *in vivo* study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2023, 34(8): 793-801
- [20] KE Y F, ZHANG Y P, WANG Y, et al. Comparing the accuracy of full-arch implant impressions using the conventional technique and digital scans with and without prefabricated landmarks in the mandible: an *in vitro* study [J]. *J Dent*, 2023, 135: 104561
- [21] ETXANIZ O, AMEZUA X, JAUREGI M, et al. Obtaining more accurate complete arch implant digital scans with the aid of a geometric pattern: a dental technique [J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 133(2): 370-375
- [22] GÓMEZ-POLO M, BALLESTEROS J, PERALES-PADILLA P, et al. Guided implant scanning: a procedure for improving the accuracy of implant-supported complete-arch fixed dental prostheses [J]. *J Prosthet Dent*, 2020, 124(2): 135-139
- [23] TALLARICO M, LUMBAU A I, SCRASCIA R, et al. Feasibility of using a prosthetic-based impression template to improve the trueness and precision of a complete arch digital impression on four and six implants: an *in vitro* study [J]. *Materials(Basel)*, 2020, 13(16): 3543
- [24] RUTKŪNAS V, AUŠKALNIS L, PLETKUS J. Intraoral scanners in implant prosthodontics. A narrative review [J]. *J Dent*, 2024, 148: 105152
- [25] NAGATA K, FUCHIGAMI K, OKUHAMA Y, et al. Comparison of digital and silicone impressions for single-tooth implants and two- and three-unit implants for a free-end

crowns designed by deep learning-based dental software: a comparative study[J]. J Dent, 2024, 141: 104830

[66] LERNER H, MOUHYI J, ADMAKIN O, et al. Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients[J]. BMC Oral Health, 2020, 20(1): 80

[67] SHETTY S, GALI S, AUGUSTINE D, et al. Artificial intelligence systems in dental shade-matching: a systematic review[J]. J Prosthodont, 2024, 33(6): 519-532

[68] VALENTE F, FALCONIO L, FALCINELLI C, et al. Artificial intelligence and finite element analysis: applications in implant dentistry[J]. Ital J Anat Embryol, 2023, 127(2): 99-103

[69] ZAW K, LIU G R, DENG B, et al. Rapid identification of elastic modulus of the interface tissue on dental implants surfaces using reduced-basis method and a neural network[J]. J Biomech, 2009, 42(5): 634-641

[70] ROY S, DEY S, KHUTIA N, et al. Design of patient specific dental implant using FE analysis and computational intelligence techniques [J]. Appl Soft Comput, 2018, 65: 272-279

[71] LI H Y, SHI M L, LIU X M, et al. Uncertainty optimization of dental implant based on finite element method, global sensitivity analysis and support vector regression[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2019, 233(2): 232-243

[72] LI A D, LI X Y, ZHANG Z W, et al. Deep learning assisted prediction of osteogenic capability of orthopedic implant surfaces based on early cell morphology[J]. Acta Biomater, 2025, 195: 559-568

[收稿日期] 2025-06-11  
(本文编辑: 戴王娟)

(上接第 1697 页)

edentulous saddle[J]. BMC Oral Health, 2021, 21(1): 464

[26] ROIG E, ROIG M, GARZA L C, et al. Fit of complete-arch implant-supported prostheses produced from an intraoral scan by using an auxiliary device and from an elastomeric impression: a pilot clinical trial [J]. J Prosthet Dent, 2022, 128(3): 404-414

[27] ANDRIESEN F S, RIJKENS D R, VAN-DER MEER W J, et al. Applicability and accuracy of an intraoral scanner for scanning multiple implants in edentulous mandibles: a pilot study[J]. J Prosthet Dent, 2014, 111(3): 186-194

[28] IMBURGIA M, LOGOZZO S, HAUSCHILD U, et al. Accuracy of four intraoral scanners in oral implantology: a comparative *in vitro* study[J]. BMC Oral Health, 2017, 17(1): 92

[收稿日期] 2025-01-08  
(本文编辑: 戴王娟)