

口腔修复诊疗中构建虚拟患者的机遇与挑战

沈颀飞

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修复科, 成都 610041

[摘要] 在口腔修复领域, 构建虚拟患者进行数字化仿生修复展现出广阔的应用前景。虚拟患者由包含口颌面部信息的数字化素材构成, 能准确地反映出口颌面结构的形态和空间关系。然而, 在数字化素材的获取、精确配准过程和动态颌位关系的记录与转移中, 均存在诸多挑战。本文将围绕虚拟患者的构建流程, 阐述目前构建虚拟患者的关键点和难点, 推动虚拟患者技术在口腔修复领域的普及和推广。

[关键词] 口腔修复; 虚拟患者; 口腔扫描; 面部扫描; 数字化颌位关系转移

[中图分类号] R783 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2024.2023317



本文链接 开放科学标识码

The chance and challenge of creating virtual patients in prosthodontics

Shen Jiefei

State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & Dept. of Prosthodontics, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2022YFC2410102)

Correspondence: Shen Jiefei, E-mail: shenjiefei@scu.edu.cn

[Abstract] In the field of prosthodontics, the use of virtual patients for biomimetic restoration holds great promise for various applications. Virtual patients consist of digitized data that encompasses details on the morphology, structure, and spatial relationships within the maxillofacial and intraoral regions. Nonetheless, there are several challenges associated with acquiring digital data, achieving accurate alignment, and recording and transferring dynamic jaw movements. This paper aims to concentrate on the process of constructing virtual patients, highlight the key and challenging aspects of virtual patient construction, and advocate for the extensive adoption and utilization of virtual patient technology.

[Key words] prosthodontics; virtual patient; intraoral scan; facial scan; digital jaw relation transferring

口腔修复诊疗中的虚拟患者 (virtual patient) 是指通过数字化扫描技术, 获取包含牙列、颌骨、面容、颞下颌关节的信息, 并进行数据配准整合、三维重建所构建的虚拟形象^[1]。构成虚拟患者的数字化素材通常包含数字化口内模型、锥形束计算机断层扫描 (cone beam computed tomography, CBCT) 数据和颜面部三维扫描图像。通过不同素

材之间的位置配准和下颌运动数据的转移, 可构成最终的虚拟患者。在口腔修复临床诊疗中, 构建虚拟患者可以准确地反映出口颌面部软硬组织的形态结构和空间关系^[2], 从三维立体层面为修复的分析设计提供重要参考。基于构建的虚拟患者, 可以进行多种治疗方案模拟和可视化结果预测, 该技术在前牙美学修复、复杂种植修复和咬合重建等病例中拥有较大的应用前景和价值, 是目前的研究热点前沿^[2-3]。

目前构成虚拟患者的三维数字化素材格式不统一, 素材精度差异较大, 且相互之间缺乏充足

[收稿日期] 2023-09-22; **[修回日期]** 2023-10-24

[基金项目] 国家重点研发计划项目 (2022YFC2410102)

[作者简介] 沈颀飞, 教授, 博士, E-mail: shenjiefei@scu.edu.cn

[通信作者] 沈颀飞, 教授, 博士, E-mail: shenjiefei@scu.edu.cn

的配准参考,使得构建虚拟患者存在设备要求高、流程复杂、精度欠佳等问题。如何获取高精度数字化素材,将不同格式的数字化素材精确配准,以及记录和转移动态颌位关系,是构建虚拟患者的重点^[2-3]。

1 虚拟患者构建技术的发展历史及应用

口腔医学领域早期依赖于传统实体模型进行分析设计;随着医学技术和计算机科学的进步,虚拟患者构建技术得以快速发展。计算机辅助设计系统的出现允许医生和技术人员在计算机上虚拟设计修复体;医学成像技术的发展引入了三维扫描技术,可用于生成较真实的口颌面部三维模型。近年来,口腔虚拟患者构建已经发展为更精细复杂的技术,可以整合包括医学成像、三维扫描在内的各种数据源,以创建高度逼真的虚拟患者^[4-5]。

虚拟患者技术在口腔修复领域有着广泛的应用。在前牙美学修复中,可以提供较全面的美学参考信息和精确的修复效果预测,促进医技患的沟通,配合辅助配准设备,实现精确的数字化颌位关系记录与转移^[6]。在复杂种植案例中,虚拟患者可以辅助进行多方案虚拟种植和修复模拟,有助于减少手术难度和提供种植修复效果。此外,在口腔颌面外科领域,虚拟患者可以准确辅助上下颌牙列定位以及精确治疗颞下颌关节紊乱^[7]。在口腔正畸领域,虚拟患者能以最佳的三维牙位为导向,实现更准确高效的诊疗^[8]。

2 虚拟患者构建中数字化素材的精准获取

构建虚拟患者所需的三维数字化素材主要包含数字化口内模型、CBCT数据与颜面部三维扫描图像,这些数字化素材具有不同的格式,经过配准整合,可构建同时显示口颌面部软硬组织的三维立体图像^[2]。精准获取这些三维数据是构建虚拟患者、并用于美学分析和设计、实现精准美学预测的前提与基石。

2.1 数字化口内模型

数字化口内模型能提供患者口内牙列、黏膜软组织结构以及咬合信息,主要由口内扫描仪或者模型光学扫描仪获取,数字化素材的格式通常为STL、DCM或PLY。口内扫描仪可直接伸入口内进行扫描,精度可高达 $7.7\ \mu\text{m}\pm 2.4\ \mu\text{m}$ ^[9],具有

患者体验舒适、操作便捷、可选定区域重新扫描等优势^[9-13]。然而,口内扫描仅能记录口内组织的表面结构信息,无法获取更深层的骨组织、下颌神经管等结构信息。口内扫描的质量受扫描范围、策略、速度、扫描头大小、软组织可动性、解剖标志缺乏、黏膜反光等诸多因素的影响^[10-13]。其中,扫描策略的选择同时影响着数字化口内上下颌模型的配准对齐。国际种植协会(International Team for Implantology, ITI)共识报告^[14]指出:1)对于单颗种植体修复的情况,使用口内扫描仪制取的印模精度与传统方式相当,且使用方便快捷,推荐使用口内扫描仪制取种植印模;2)对于无牙颌种植修复,或多颗种植体修复同时种植体间距较大时,口内扫描的印模精度会显著下降,此时不建议使用口内扫描的方式制取印模;3)扫描策略对印模精度有显著影响,应遵循不同口内扫描仪厂家适配的扫描策略。此外研究^[12,15]指出,针对口内扫描制取的数字化印模在无牙颌种植以及种植体间距较大方面的局限,通过在缺牙区添加人工解剖标志可提高扫描的准确度。

模型光学扫描仪需扫描制取的印模或模型来间接获取数字化口内模型,具有较高的精度与真实度,适用于预备后基牙边缘位于龈下较深、血液渗出难以控制、隔湿困难等口内扫描仪不适用的情况下,但无法避免印模制取、石膏灌注等传统流程带来的误差^[8,10,15-17]。

2.2 CBCT数据

CBCT数据主要提供口颌面部的颌骨、牙列等硬组织信息,由CBCT扫描设备获取,得到的数字化素材格式为DICOM数据集。CBCT数据三维重建后的精度欠佳,0.2 mm体素下精度为 $0.434\ 2\ \text{mm}\pm 0.031\ 8\ \text{mm}$,通常需与数字化口内模型配准后再进行修复或种植设计^[18]。CBCT扫描的精度受众多因素影响,如扫描系统、视野、曝光时间、管电压管电流以及体素大小等^[19]。其中,体素越小,扫描成像时间越会相应急剧增大;扫描视野、时间、体素大小等因素同时决定着CBCT辐射剂量的大小^[19]。在拍摄CBCT前,需嘱咐患者取下拍摄范围内的高密度物体如金属饰物、活动假牙以防止或减少伪影^[20]。同时,嘱患者将上下颌咬于牙尖交错位,调整水平激光线与咬合平面一致,垂直激光线位于患者中线^[20]。在拍摄过程中,患者需保持姿势稳定以减少运动伪影。

2.3 颜面部三维扫描图像

三维面部信息可提供患者面部形态特征、面

中线以及各种表情下的唇齿关系等信息,通常由面部扫描仪拍摄获取,得到的数字化素材通常为OBJ格式。近年来基于计算机辅助设计/辅助制作的数字化技术,在设计时通常参考的是内部修复体形态数据库,修复体的设计与患者的面部信息是完全脱离的,可能出现中线偏斜、唇齿不协调等问题^[21]。目前常利用二维照片进行数字化微笑设计(digital smile design, DSD),但是二维的美学设计存在唇舌向突度信息丢失、照片拍摄角度差异、照片与数字化口内模型配准精度低等问题^[22]。对于美学修复而言,牙齿的形态大小应适应患者个性化的面部特征,三维面部信息的获取对于美学分析设计、修复治疗的成功至关重要^[23]。与口内扫描仪、模型光学扫描仪或CBCT扫描设备相比,面部扫描仪的精度相对较低。但目前通常认为临床可接受的精度范围为 $<0.6\text{ mm}$,可满足临床的日常使用^[23-24]。由于存在口唇组织遮挡、口内唾液沾染反光等干扰,面部扫描仪对牙齿的扫描成像质量不理想,常需要与高精度数字化口内模型配准,以用于后续的治疗设计。通过拍摄多种表情下的颜面部三维扫描图像并进行叠加配准,可获得不同状态下的面部信息,为后续的分析设计提供更全面的参考。此外,可在面部软组织动度较小的区域粘贴标志点,以利于不同表情的颜面部三维扫描图像之间的配准^[25-26]。

2.4 颌位关系及下颌运动

颌位关系及下颌运动的记录和转移可利用下颌运动轨迹机械描记仪和下颌运动轨迹电子描记仪,前者是通过机械描记髁突运动轨迹,而后者主要是一种实时监测和记录下颌运动的数字化设备^[27-28]。下颌运动轨迹电子描记仪通常由传感器和计算机软件组成,可以实时跟踪患者下颌的三维运动,但其存在成本较昂贵、技术敏感性较高、普及较困难等问题。根据工作原理的不同可分为超声式、光学式和磁电式^[29-31]。在测试前对患者进行一定的下颌运动指导以获取相对可重复性下颌运动轨迹的基础上,下颌运动轨迹电子描记仪会受到来自设备自身和患者因素带来的误差影响,实际误差在 $50\sim 330\ \mu\text{m}$ 之间^[32]。除此之外,稳定的环境温度、环境光、声音以及磁场是获取高精度的下颌运动数据的必备条件^[33]。

获取口颌面部三维数字化素材的精度受扫描系统、扫描技术、扫描策略等主客观因素的影响,且目前没有一体式虚拟患者数字化素材的采集设备。不同素材的获取需要较多的设备及时间成本,

且不同数字化素材之间的配准需手动进行,流程较复杂,配准精度受多方面因素影响。要建立高精度的虚拟患者,除三维数字化素材的精确获取以外,素材之间的配准整合是另一重要方面。

3 静态虚拟患者的构建

静态虚拟患者构建的核心在于将不同设备采集的具有不同格式的数字化素材导入单一软件系统内,并进行数据的处理和配准。在分析处理这些数字化素材时,目前常使用专业三维扫描分析软件Geomagic系列或口腔数字化设计软件Exocad。如何在专业软件中将这些数字化素材精确配准整合,减少配准误差,是构建虚拟患者的关键^[2,34]。

3.1 数字化口内模型和CBCT数据的配准

数字化口内模型与CBCT数据的配准基础在于共有的牙列结构,两者之间的配准相对较容易,也常常作为构建虚拟患者的第一步。

对于牙列较完整的患者,可以直接根据共有的牙列结构(图1A~C)将两者进行配准并实现良好的匹配效果^[35]。根据配准方式的不同,可分为局部配准和全局配准。对于局部配准而言,配准点的数量与最终配准精度密切相关。以三点配准为例,配准误差为 $17.63\ \mu\text{m}$,而继续增加配准点也不会显著提高准确度^[36]。此外,在软件内手动选择配准点位置的准确与否将直接影响配准精度,同时应尽可能将配准点均匀分布于整个牙列,且多位于牙尖顶点等容易分辨的位置^[36]。

对于多颗牙缺失或无牙颌患者,数字化口内模型与CBCT数据中能够使用的配准参考点较少或缺乏,需利用放射导板等装置辅助配准(图1D~F)。患者佩戴放射导板拍摄CBCT后,导板标记点内的阻射材料会在CBCT中显影,然后单独对放射导板进行放射学或光学扫描,以导板内的阻射点作为配准参考点,将放射导板扫描模型与患者的CBCT数据进行配准,然后再将放射导板与数字化口内模型配准。放射导板上的标记点应尽可能扩大分布面积和不规则分布,以提高配准时的准确度^[37]。

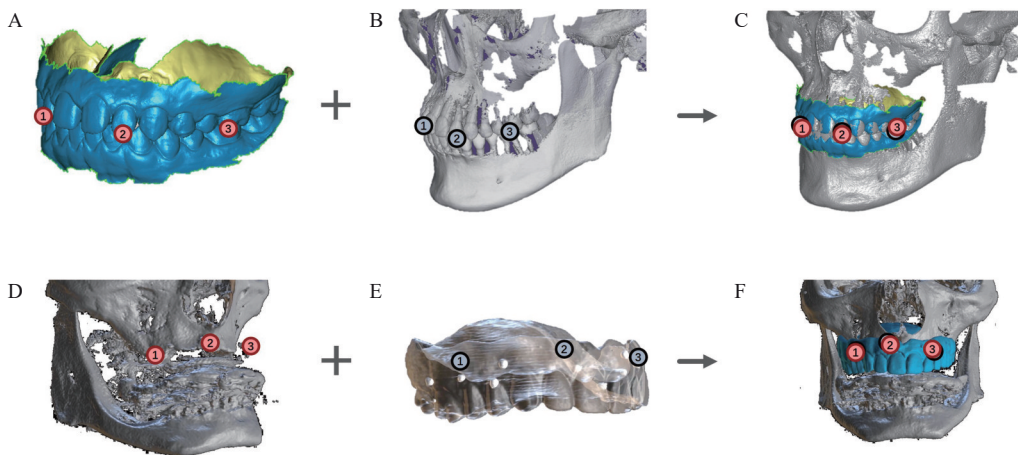
3.2 数字化口内模型和颜面部三维扫描图像的配准

数字化口内模型与颜面部三维扫描图像的共有结构较少,两者之间的配准具有一定难度。目前常见的方法有直接法和媒介法。

直接法是指在拍摄颜面部三维扫描图像时,

尽可能暴露出前牙并保持唇面干燥，以前牙区的牙体形态作为参考，配准数字化口内模型和颜面部三维扫描图像^[38]。为提高配准质量，可以使用唇颊牵开器，尽可能暴露至上颌第一前磨牙，在

该情况下的配准精度被认为是临床可接受的。直接法对面部扫描仪的精度要求较高，此外，对于前牙缺损缺失的患者而言，能够用于配准参考的范围有限。



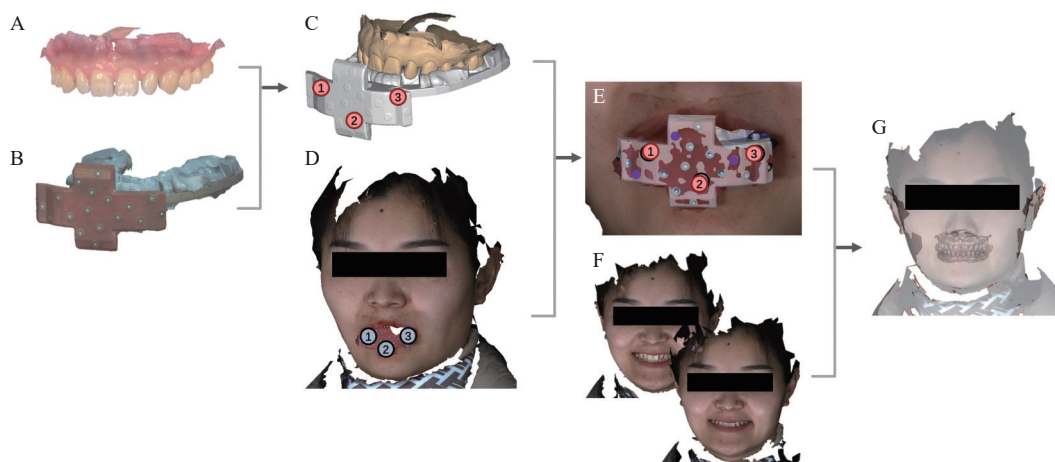
A~C为牙列较完整的情况，A：数字化口内模型；B：三维重建的CBCT数据；C：根据共有的牙列进行配准。D~F为多颗牙缺失或无牙颌的情况，D：佩戴放射导板时的三维重建CBCT数据；E：单独扫描放射导板时的三维重建数据；F：根据共有的放射导板阻射点进行配准。

图 1 数字化口内模型与CBCT数据的配准流程

Fig 1 The workflow of aligning digital intraoral impressions with CBCT scans

媒介法（图2）是借助 Virtual Facebow 进行配准^[39]。Virtual Facebow 是一种基于颌位关系，将数字化口内模型转移至虚拟颌架上的装置^[38]。国内暂无统一的名称，由于该装置的使用和用途类似传统的机械式面弓，本文使用“虚拟面弓”一词来代表。虚拟面弓可以分别与数字化口内模型和颜面部三维扫描图像配准，以虚拟面弓为媒介，可将两者进行配准。该方法的配准精度与虚拟面

弓的设计关系密切，应首选不易变形、无明显反光的材料制作面弓装置；结构设计应尽可能精巧，避免对患者面部的大面积遮挡，尤其不能遮挡面部标志点^[40]。研究^[29]显示，利用标记配准点的虚拟面弓辅助装置及口内咬合记录，能以较高精度转移数字化口内模型与颜面部三维扫描图像之间的相对位置关系。



A：数字化口内模型；B：虚拟面弓的光学扫描模型；C：根据咬合印记，将数字化口内模型与虚拟面弓扫描模型配准；D：佩戴虚拟面弓的颜面部三维扫描图像；E：根据面弓弓体形态，将颜面部三维扫描图像与虚拟面弓扫描模型配准；F：不同表情下的颜面部三维扫描图像，根据前额等区域进行配准；G：数字化口内模型与不同表情的颜面部三维扫描图像成功配准。

图 2 数字化口内模型与颜面部三维扫描图像的媒介法配准流程

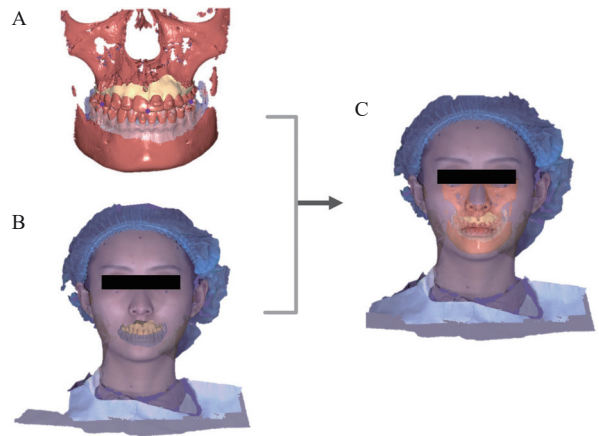
Fig 2 The workflow of aligning digital intraoral impressions with facial scans

通过上述两个步骤，即将数字化口内模型与CBCT数据配准后，再将颜面部三维扫描图像与数字化口内模型配准（图3），可构建出静态虚拟患者^[23,29,41-45]。配准的关键在于寻找稳定的结构和部位，例如牙体等硬组织和动度较小的软组织^[23,35,46]。

在实际临床中，会出现数字化素材不全的情况，然而即使缺失某些素材，也可在一定程度上构建虚拟患者。虽然会损失部分信息或牺牲部分精度，但仍能提供较完善的分析设计和结果预测，有利于提高诊疗效果（图4）。如：在对比接受正颌手术前后患者的软硬组织轮廓变化程度时，尽管CBCT与颜面部三维扫描图像配准精度会因面部软组织存在动度而降低，但利用前额、颧骨等动度较小的区域进行配准，其精度也足够支撑其研究^[47]。此外，对于较简单的前牙美学修复病例，仅需要将数字化口内模型数据与面部三维图像数据进行配准，无须CBCT数据即可完成较完善的数字化修复设计^[48]。

在静态虚拟患者的构建过程中，每一次数字化素材的配准误差都会累积，可能导致最终虚拟构建的效果与真实情况偏差较大。目前有关虚拟患者的研究主要在于构建方法上，而缺乏较系统

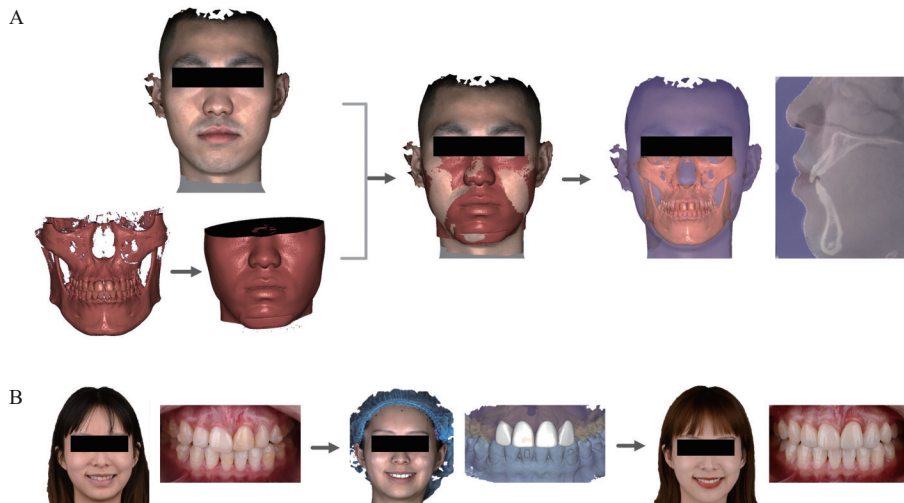
性的研究以评估整体的准确性。此外，在实际口腔修复诊疗中，静态虚拟患者无法反映患者的咬合运动、不同表情下的唇齿关系等，因而应用较局限。让静态虚拟患者“动”起来，为修复体的设计和制作提供更全面合理的参考，是至关重要的。



A: 数字化口内模型与三维重建的CBCT数据配准; B: 数字化口内模型与颜面部三维扫描图像配准; C: 根据共有的数字化口内模型，完成静态虚拟患者的构建。

图3 静态虚拟患者的构建流程

Fig 3 The workflow of constructing static virtual patients



A: CBCT数据与颜面部三维扫描图像配准后，用于软硬组织轮廓变化分析; B: 数字化口内模型与颜面部三维扫描图像配准后用于前牙美学修复设计。

图4 数字化素材种类不全时的虚拟患者构建流程

Fig 4 The workflow of constructing virtual patients in cases of incomplete types of digital models

4 动态虚拟患者的发展和挑战

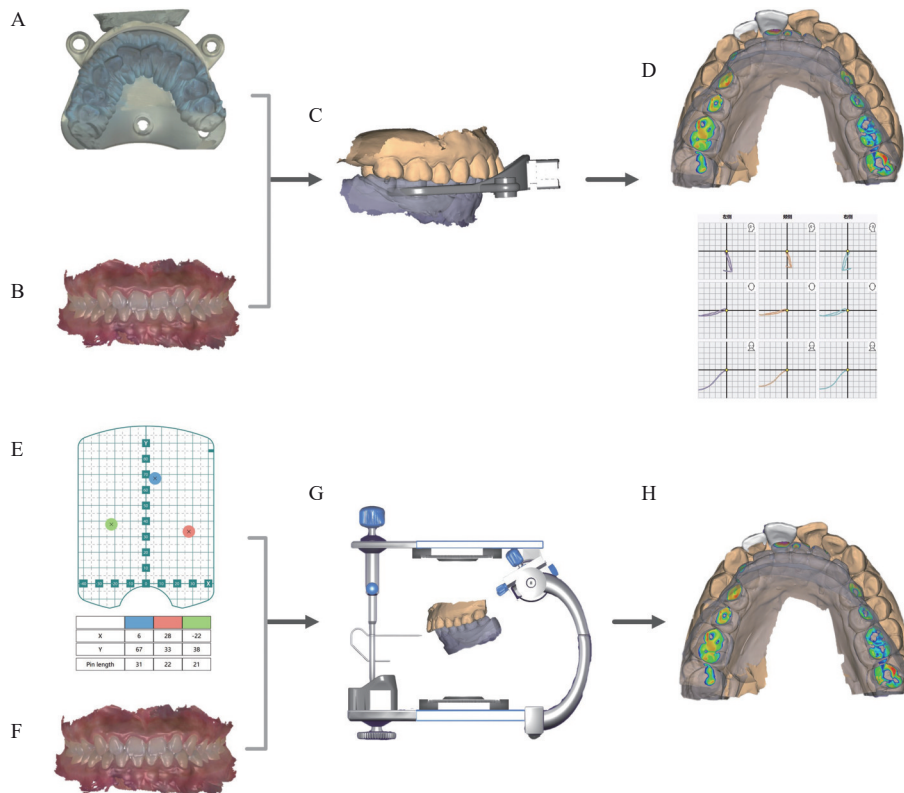
构建动态虚拟患者的关键在于获取患者动态下颌运动轨迹、面部肌肉运动、牙列咬合状态并进行整合，目前主要有基于数字化下颌运动记录

和分析、基于运动参数直接导入和基于解剖相关素材三种方式。

下颌运动轨迹电子描记仪可以通过超声或光学的方式，动态记录下颌骨相对于上颌骨的位置关系，获取个性化的下颌运动轨迹及相关运动参数^[28,49]。将数字化口内模型与带有咬合印记的上颌

叉模型配准，在记录了患者个性化下颌运动后，便可用于修复体咬合设计与调改。利用个性化下颌运动轨迹（图 5A~D）直接设计制作的修复体的殆面形态更适合患者自身咬合，可以减少临床调殆操作时间和难度，降低因修复体咬合不正确导致的殆干扰、殆创伤、崩瓷或修复体脱落的风险^[3,50]。但是记录下颌运动的设备操作复杂、技术敏感性高且价格昂贵，限制了其广泛应用^[49]。此外，在数字化牙科软件中，可以导入下颌运动轨

迹电子描记仪的运动参数文件，自动完成虚拟殆架的转移（图 5E~H），然后根据殆架间接模拟咬合运动^[51]。以上两种方式均能将静态虚拟患者动态化^[52]。尽管虚拟殆架具有价格适宜、用户友好的优势，但其无法模拟患者的个性化运动^[52]。根据本团队的临床研究，由个性化下颌运动轨迹对单颗后牙修复体或 3 颗连续后牙修复体进行虚拟调磨的作用较使用下颌运动轨迹电子描记仪的运动参数结合虚拟殆架更有效^[53]。



A~D为利用个性化下颌运动轨迹直接设计制作修复体，A：下颌运动轨迹电子描记仪记录患者下颌运动后带有咬合印记的上颌板模型；B：牙尖交错位数字化口内模型；C：上颌板与牙尖交错位数字化口内模型配准；D：下颌运动轨迹被用于修复体咬合调改。E~H为利用运动参数文件转移至虚拟殆架设计制作修复体，E：下颌运动轨迹电子描记仪记录患者下颌运动后的运动参数；F：牙尖交错位数字化口内模型；G：完成虚拟殆架的转移；H：在虚拟殆架上进行修复体咬合调改。

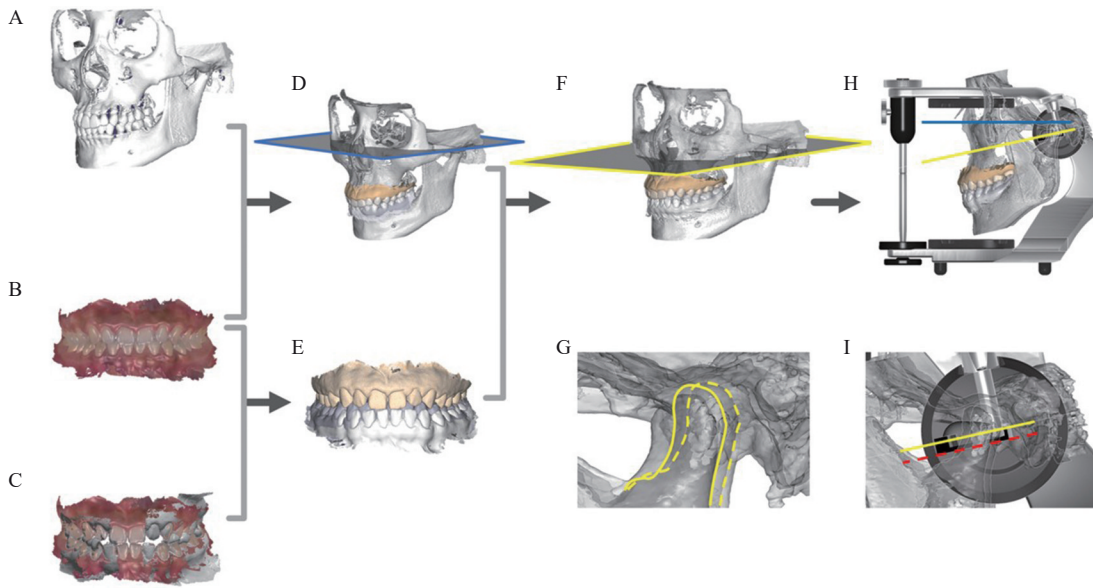
图 5 数字化下颌运动轨迹记录与虚拟殆架的转移

Fig 5 Digital recording of mandible movement and transfer to virtual articulators

与传统机械式颌位关系转移类似，基于解剖相关素材的颌位关系转移，是在静态虚拟患者的基础上，利用口内扫描仪记录不同颌位下的数字化素材并进行整合分析，完成前伸、侧方颌位关系的转移，不需要借助额外的数字化工具，降低了构建动态虚拟患者的成本^[41,54-55]。该方法的关键在于利用CBCT数据（图 6）或颜面部三维扫描图像（图 7）来确定髁突铰链轴和参考平面，并转移至虚拟颌架。

在定位铰链轴时，若使用CBCT数据，双侧髁

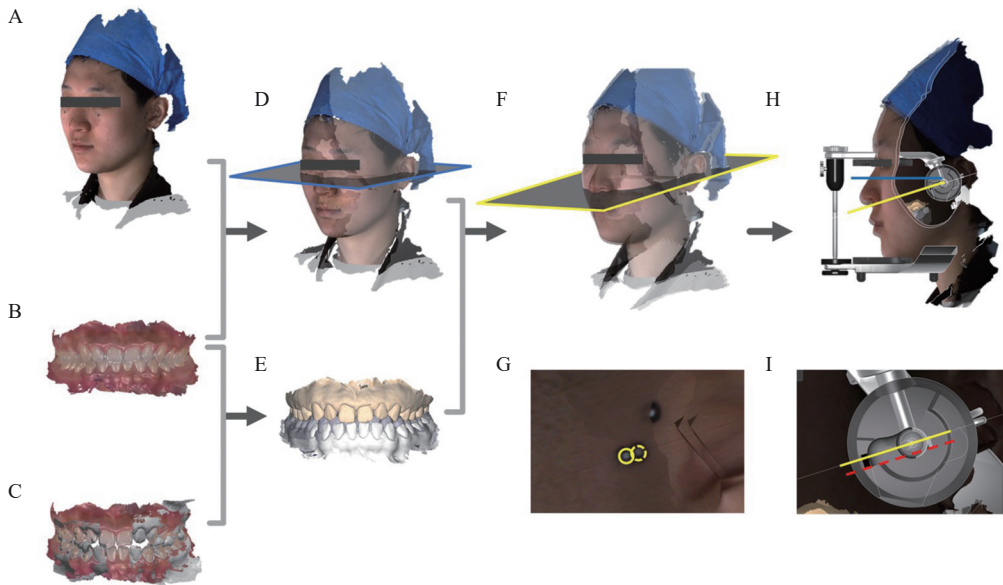
突最内侧点难以准确定位；而对于颜面部三维扫描图像，由于皮肤结构的可动性及不可预见性，由此定位铰链轴可能存在较大误差。在确定参考平面时，需要先确定所选的虚拟殆架系统，不同的殆架系统所需的参考平面存在差异^[52]。求取虚拟前伸和侧方髁导的过程类似于传统机械式殆架的转移过程^[26]。但是前伸和侧方髁道均为曲线，而且部分患者可以观察到迅即侧移，仅使用相关解剖素材进行颌位关系转移，难以完全模拟下颌的运动。



A: 牙尖交错位的三维重建CBCT数据; B: 牙尖交错位数字化口内模型; C: 前伸颌位数字化口内模型; D: 三维重建CBCT数据与牙尖交错位数字化口内模型配准 (蓝色方框代表眶耳平面); E: 牙尖交错位数字化口内模型与前伸颌位数字化口内模型配准; F: 三维重建CBCT数据与前伸颌位数字化口内模型配准 (黄色方框为牙尖交错位与前伸颌位的两侧髁突铰链轴的连线所在平面, 代表前伸髁道参考平面); G: 髁突的位置 (黄色虚线代表原始的髁突位置, 黄色实线代表前伸后的髁突位置); H: 数字化模型配准至虚拟颌架上 (蓝色线段代表眶耳平面, 黄色线段代表前伸髁道参考平面); I: 通过调整虚拟颌架的髁导盘测量前伸髁道斜度 (黄色线段代表前伸髁道, 红色虚线代表髁导盘角度)。

图 6 基于CBCT数据进行数字化颌位关系转移

Fig 6 Digital transfer of jaw position based on CBCT scans



A: 牙尖交错位时的颜面部三维扫描图像; B: 牙尖交错位数字化口内模型; C: 前伸颌位数字化口内模型; D: 颜面部三维扫描图像与牙尖交错位数字化口内模型配准 (蓝色方框代表眶耳平面); E: 牙尖交错位数字化口内模型与前伸颌位数字化口内模型配准; F: 颜面部三维扫描图像与前伸颌位数字化口内模型配准 (黄色平面为牙尖交错位与前伸颌位的两侧髁突铰链轴的连线所在平面, 代表前伸髁道参考平面); G: 髁突的位置 (黄色虚线代表原始的髁突位置, 黄色实线代表前伸后的髁突位置); H: 数字化模型配准至虚拟颌架上 (蓝色线段代表眶耳平面, 黄色线段代表前伸髁道参考平面); I: 通过调整虚拟颌架的髁导盘测量前伸髁道斜度 (黄色线段代表前伸髁道, 红色虚线代表髁导盘角度)。

图 7 基于颜面部三维扫描图像进行数字化颌位关系转移

Fig 7 Digital transfer of jaw position based on facial scans

根据本团队研究,利用口内模型结合CBCT与口内模型结合颜面部三维扫描图像两种方法获取前伸髁导斜度均具有较好的一致性。但是利用CBCT数据获得的前伸髁导斜度与利用颜面部三维扫描图像和虚拟殆架获得的前伸髁导斜度测量值偏低^[26]。未来可以在CAD软件中整合基于大数据的下颌前伸、侧方、迅即侧移的曲线运动模块,藉此实现仅使用相关解剖素材模拟个性化下颌运动。

随着数字化及人工智能的发展与普及,动态虚拟患者越来越多地被应用于口腔修复、颞下颌关节、口腔外科等临床场景^[3,56-58]。创建动态虚拟患者可以为口腔修复治疗提供更全面的美学和功能指导,然而目前仍存在不少挑战,例如操作过程复杂费时、转移精度有待提高等。

5 虚拟患者的展望

在现代修复学治疗中,虚拟患者的应用具有无限的可能性。目前虚拟患者存在如下的问题:数字化素材采集设备种类较多,CBCT存在放射辐射,素材配准流程繁琐,技术敏感性高等。未来开发多模态数字化素材采集设备,实现一台设备便能扫描获得数字化口内模型、CBCT数据和三维面部数据,有望大幅降低虚拟患者构建的时间和设备成本。结合人工智能技术,有望实现各类数字化素材的超分辨率重建和全自动化配准,进一步提高虚拟患者的构建精度和效果^[59-61]。

此外,修复体颜色在“虚拟”环境中的准确预告与在“现实”环境中的准确重现仍是一个挑战,发展基于真实感渲染的虚拟患者,实现形态、色彩的双重准确预测和展现,可能是将来的重要发展方向。基于真彩实时渲染的虚拟患者,随着虚拟现实和增强现实技术的不断发展,有望构建面向口腔健康诊疗的元宇宙。面对这样的机遇,我们必须通过不断创新来克服挑战,以期在今后能够实现高精度、全自动的数字化修复分析、设计和治疗流程,向数字诊疗元宇宙看齐。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Joda T, Brägger U, Gallucci G. Systematic literature review of digital three-dimensional superimposition techniques to create virtual dental patients[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2015, 30(2): 330-337.
- [2] Joda T, Gallucci GO. The virtual patient in dental medicine[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2015, 26(6): 725-726.
- [3] Li Q, Bi M, Yang K, et al. The creation of a virtual dental patient with dynamic occlusion and its application in esthetic dentistry[J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 126(1): 14-18.
- [4] Monterubbianesi R, Tosco V, Vitiello F, et al. Augmented, virtual and mixed reality in dentistry: a narrative review on the existing platforms and future challenges[J]. *Appl Sci*, 2022, DOI:10.3390/app12020877.
- [5] Zimmermann R, Seitz S. The impact of technological innovation on dentistry[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2023, 1406: 79-102.
- [6] Pérez-Giugovaz MG, Mostafavi D, Revilla-León M. Additively manufactured scan body for transferring a virtual 3-dimensional representation to a digital articulator for completely edentulous patients[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(6): 1171-1178.
- [7] Gateno J, Xia JJ, Teichgraber JF, et al. Clinical feasibility of computer-aided surgical simulation (CASS) in the treatment of complex cranio-maxillofacial deformities [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2007, 65(4): 728-734.
- [8] Ender A, Attin T, Mehl A. *In vivo* precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions[J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 115(3): 313-320.
- [9] Dupagne L, Tapie L, Lebon N, et al. Comparison of the acquisition accuracy and digitizing noise of 9 intraoral and extraoral scanners: an objective method[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(5): 1032-1040.
- [10] Kernen F, Schlager S, Seidel Alvarez V, et al. Accuracy of intraoral scans: an *in vivo* study of different scanning devices[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(6): 1303-1309.
- [11] Kihara H, Hatakeyama W, Komine F, et al. Accuracy and practicality of intraoral scanner in dentistry: a literature review[J]. *J Prosthodont Res*, 2020, 64(2): 109-113.
- [12] Kim JE, Amelya A, Shin Y, et al. Accuracy of intraoral digital impressions using an artificial landmark[J]. *J Prosthet Dent*, 2017, 117(6): 755-761.
- [13] Conejo J, Dayo AF, Syed AZ, et al. The digital clone[J]. *Dent Clin North Am*, 2021, 65(3): 529-553.
- [14] Wismeijer D, Joda T, Flügge T, et al. Group 5 ITI consensus report: digital technologies[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2018, 29(Suppl 16): 436-442.

- [15] Runkel C, Güth JF, Erdelt K, et al. Digital impressions in dentistry—accuracy of impression digitalisation by desktop scanners[J]. *Clin Oral Investig*, 2020, 24(3): 1249-1257.
- [16] Borbola D, Berkei G, Simon B, et al. *In vitro* comparison of five desktop scanners and an industrial scanner in the evaluation of an intraoral scanner accuracy[J]. *J Dent*, 2023, 129: 104391.
- [17] Flüge TV, Schlager S, Nelson K, et al. Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013, 144(3): 471-478.
- [18] Mukhia N, Birur NP, Shubhasini AR, et al. Dimensional measurement accuracy of 3-dimensional models from cone beam computed tomography using different voxel sizes[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*, 2021, 132(3): 361-369.
- [19] Sang YH, Hu HC, Lu SH, et al. Accuracy assessment of three-dimensional surface reconstructions of *in vivo* teeth from cone-beam computed tomography[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2016, 129(12): 1464-1470.
- [20] Hilgenfeld T, Juerchott A, Deisenhofer UK, et al. *In vivo* accuracy of tooth surface reconstruction based on CBCT and dental MRI—A clinical pilot study[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2019, 30(9): 920-927.
- [21] Karl M. *In vitro* studies on CAD/CAM restorations fabricated with Procera technology: an overview[J]. *Quintessence Int*, 2015, 46(7): 561-574.
- [22] 冯玥, 胡仲琳, 刘伟才. 三维虚拟牙科患者的建立对前牙美学修复效果的影响研究[J]. *口腔医学*, 2022, 42(10): 905-910.
Feng Y, Hu ZL, Liu WC. Study on the effect of the establishment of three-dimensional virtual dental patients on aesthetic restoration outcomes of anterior teeth[J]. *Stomatology*, 2022, 42(10): 905-910.
- [23] Antonacci D, Caponio VCA, Troiano G, et al. Facial scanning technologies in the era of digital workflow: a systematic review and network meta-analysis[J]. *J Prosthodont Res*, 2023, 67(3): 321-336.
- [24] Michelinakis G, Apostolakis D, Velidakis E. An *in vitro* comparison of accuracy between three different face scanning modalities[J]. *Eur J Prosthodont Restor Dent*, 2023, 31(3): 296-307.
- [25] Mei J, Ma L, Chao J, et al. Three-dimensional analysis of the outcome of different scanning strategies in virtual interocclusal registration[J]. *J Adv Prosthodont*, 2022, 14(6): 369-378.
- [26] Ma L, Liu F, Mei J, et al. A comparative study to measure the sagittal condylar inclination using mechanical articulator, virtual articulator and jaw tracking device[J]. *J Adv Prosthodont*, 2023, 15(1): 11-21.
- [27] Naqash TA, Chaturvedi S, Yaqoob A, et al. Evaluation of sagittal condylar guidance angles using computerized pantographic tracings, protrusive interocclusal records, and 3D-CBCT imaging techniques for oral rehabilitation [J]. *Niger J Clin Pract*, 2020, 23(4): 550-554.
- [28] Revilla-León M, Kois DE, Zeitler JM, et al. An overview of the digital occlusion technologies: intraoral scanners, jaw tracking systems, and computerized occlusal analysis devices[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2023, 35(5): 735-744.
- [29] Kwon JH, Im S, Chang M, et al. A digital approach to dynamic jaw tracking using a target tracking system and a structured-light three-dimensional scanner[J]. *J Prosthodont Res*, 2019, 63(1): 115-119.
- [30] Cimić S, Simunković SK, Badel T, et al. Measurements of the sagittal condylar inclination: intraindividual variations[J]. *Cranio*, 2014, 32(2): 104-109.
- [31] Röhrle O, Waddell JN, Foster KD, et al. Using a motion-capture system to record dynamic articulation for application in CAD/CAM software[J]. *J Prosthodont*, 2009, 18(8): 703-710.
- [32] Farook TH, Rashid F, Alam MK, et al. Variables influencing the device-dependent approaches in digitally analysing jaw movement—a systematic review[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(2): 489-504.
- [33] Tian SK, Dai N, Li LL, et al. Three-dimensional mandibular motion trajectory-tracking system based on BP neural network[J]. *Math Biosci Eng*, 2020, 17(5): 5709-5726.
- [34] Revilla-León M, Raney L, Piedra-Cascón W, et al. Digital workflow for an esthetic rehabilitation using a facial and intraoral scanner and an additive manufactured silicone index: a dental technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2020, 123(4): 564-570.
- [35] Lepidi L, Chen Z, Ravida A, et al. A full-digital technique to mount a maxillary arch scan on a virtual articulator[J]. *J Prosthodont*, 2019, 28(3): 335-338.
- [36] Jamjoom FZ, Yilmaz B, Johnston WM. Impact of number of registration points on the positional accuracy of a

- prosthetic treatment plan incorporated into a cone beam computed tomography scan by surface scan registration: an *in vitro* study[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2019, 30(8): 826-832.
- [37] Chai J, Liu X, Schweyen R, et al. Accuracy of implant surgical guides fabricated using computer numerical control milling for edentulous jaws: a pilot clinical trial[J]. *BMC Oral Health*, 2020, 20(1): 288.
- [38] Solaberrieta E, Garmendia A, Minguez R, et al. Virtual facebow technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 114(6): 751-755.
- [39] 王振宇, 沈颀飞, 刘飞, 等. 一种新型面弓及其应用: 中国, 111772843A[P]. 2020-10-16.
Wang ZY, Shen JF, Liu F, et al. A new face bow and its application: China, 111772843A[P]. 2020-10-16.
- [40] Lam WY, Hsung RT, Choi WW, et al. A 2-part facebow for CAD-CAM dentistry[J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 116(6): 843-847.
- [41] Hong SJ, Noh K. Setting the sagittal condylar inclination on a virtual articulator by using a facial and intraoral scan of the protrusive interocclusal position: a dental technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 125(3): 392-395.
- [42] Revilla-León M, Zandinejad A, Nair MK, et al. Accuracy of a patient 3-dimensional virtual representation obtained from the superimposition of facial and intraoral scans guided by extraoral and intraoral scan body systems[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(5): 984-993.
- [43] 李苏娜, 张怡, 魏青, 等. 三维冠根整合数字化模型在口腔临床中的应用研究[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2021, 14(1): 53-58.
Li SN, Zhang Y, Wei Q, et al. Application of three-dimensional reconstruction of tooth crown and root with digital models in oral clinic[J]. *Chin J Pract Stomatol*, 2021, 14(1): 53-58.
- [44] 刘涛, 金伟, 顾园颖, 等. 一种基于配准融合的三维牙齿模型重建方法[J]. *生物医学工程与临床*, 2022, 26(5): 549-555.
Liu T, Jin W, Gu YY, et al. Three-dimensional tooth model reconstruction method based on registration and integration[J]. *Biomed Eng Clin Med*, 2022, 26(5): 549-555.
- [45] 邹晨, 邹道星, 艾毅龙. 口内三维扫描结合CBCT建立数字化模型的研究[J]. *口腔医学研究*, 2019, 35(9): 902-905.
Zou C, Zou DX, Ai YL. Study on three dimensional digitalized dental model based on intraoral scanners and cone-beam computed tomography[J]. *J Oral Sci Res*, 2019, 35(9): 902-905.
- [46] 国丹妮, 潘韶霞, 衡墨笛, 等. 应用于无牙颌种植修复设计的三维面部扫描配准方法的对比[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2021, 53(1): 83-87.
Guo DN, Pan SX, Heng MD, et al. Comparison of the registration methods for the three-dimensional facial scans applied to the design of full-arch implant supported restoration[J]. *J Peking Univ Heal Sci*, 2021, 53(1): 83-87.
- [47] 史雨林. 骨性Ⅲ类患者正颌手术前后面部软硬组织变化的3D研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2019.
Shi YL. 3D research of facial soft and bone tissue changes of skeletal class III patients before and after orthognathic surgery[D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2019.
- [48] Conejo J, Dayo AF, Syed AZ, et al. The digital clone: intraoral scanning, face scans and cone beam computed tomography integration for diagnosis and treatment planning[J]. *Dent Clin North Am*, 2021, 65(3): 529-553.
- [49] Ahlers MO, Bernhardt O, Jakstat HA, et al. Motion analysis of the mandible: guidelines for standardized analysis of computer-assisted recording of condylar movements[J]. *Int J Comput Dent*, 2015, 18(3): 201-223.
- [50] Hobo S, Shillingburg HT, Whitsett LD. Articulator selection for restorative dentistry[J]. *J Prosthet Dent*, 1976, 36(1): 35-43.
- [51] Anderson GC, Schulte JK, Arnold TG. An *in vitro* study of an electronic pantograph[J]. *J Prosthet Dent*, 1987, 57(5): 577-580.
- [52] Lepidi L, Galli M, Mastrangelo F, et al. Virtual articulators and virtual mounting procedures: where do we stand[J]. *J Prosthodont*, 2021, 30(1): 24-35.
- [53] 马丽娅, 巢家瑞, 刘飞, 等. 基于下颌运动轨迹与虚拟髁架运动参数模拟调髁的对比研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 2023, 41(3): 254-259.
Ma LY, Chao JR, Liu F, et al. A comparative study based on the mandibular movement track and the movement parameters of the virtual articulator in simulating occlusal adjustment[J]. *West China J Stomatol*, 2023, 41(3): 254-259.
- [54] Farias-Neto A, Dias AH, de Miranda BF, et al. Face-bow transfer in prosthodontics: a systematic review of the literature[J]. *J Oral Rehabil*, 2013, 40(9): 686-692.

- [55] Hong SJ, Choi Y, Park M, et al. Setting the sagittal condylar inclination on a virtual articulator using intraoral scan of protrusive interocclusal position and cone beam computed tomography[J]. J Prosthodont, 2020, 29(2): 185-189.
- [56] Lepidi L, Suriano C, Wang HL, et al. Digital fixed complete-arch rehabilitation: from virtual articulator mounting to clinical delivery[J]. J Prosthet Dent, 2022, 127(3): 398-403.
- [57] Levine JP, Patel A, Saadeh PB, et al. Computer-aided design and manufacturing in craniomaxillofacial surgery: the new state of the art[J]. J Craniofac Surg, 2012, 23(1): 288-293.
- [58] Azarmehr I, Stokbro K, Bell RB, et al. Surgical navigation: a systematic review of indications, treatments, and outcomes in oral and maxillofacial surgery[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2017, 75(9): 1987-2005.
- [59] Wang Z, Chen J, Hoi SCH. Deep learning for image super-resolution: a survey[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2021, 43(10): 3365-3387.
- [60] Lai WS, Huang JB, Ahuja N, et al. Fast and accurate image super-resolution with deep Laplacian pyramid networks[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2019, 41(11): 2599-2613.
- [61] Heo MS, Kim JE, Hwang JJ, et al. Artificial intelligence in oral and maxillofacial radiology: what is currently possible[J]. Dentomaxillofac Radiol, 2020, 50(3): 20-200375.

· 专家介绍 ·



沈颀飞，教授，主任医师，博士研究生导师，现任四川大学华西口腔医学院（华西口腔医院）党委副书记、纪委书记。国家重点研发计划首席科学家、国际牙医师学院（ICD）Fellow、英国皇家内外科学院（RCPSG）Fellow、四川省学术技术带头人后备人选、四川省卫生健康委学术技术带头人。主要从事口腔修复及交叉领域的基础和临床研究，擅长口腔数字化诊疗技术、种植修复中的数字化设计和美学修复。担任国际牙科研究协会（IADR）会员发展委员会主任委员、中华口腔医学会口腔修复专业委员会常务委员、中华口腔医学会口腔医学设备器材分会副主任委员等，担任SCI收录期刊 *International Journal of Oral Science* 执行主编、*Bone Research* 助理主编。

（本文编辑 李彩）

《华西口腔医学杂志》入选第6届中国精品科技期刊

2023年9月20日，中国科学技术信息研究所主办的“2023年中国科技论文统计结果发布会暨中国一流科技论文世界影响力评价论坛”在北京召开。会议上公布了第6届中国精品科技期刊名单，《华西口腔医学杂志》榜上有名，继2008、2011、2014、2017、2020年连续五届入选以来，第6次入选中国精品科技期刊，即“中国精品科技期刊顶尖学术论文（F5000）”项目来源期刊。

为提升中国科技期刊的整体水平，打造精品科技期刊的概念，推动中国科技期刊评价体系的研究，中国科学技术信息研究所从2008年开始发布中国精品科技期刊和国际化精品科技期刊名单，评选工作每三年一届。今年公布的第6届中国精品科技期刊名单，包括300种以中文出版的中国精品科技期刊和27种以英文出版的中国国际化精品科技期刊，是中国各学科领域中较重要且能反映本学科发展水平的科技期刊。

