

数字化技术和人工智能在上颌窦底提升术的临床应用

张辉¹ 蔡敏^{1,2} 黄湘雅¹

¹中山大学附属口腔医院, 光华口腔医学院, 广东省口腔医学重点实验室, 广州 510055;

²瑞典卡罗林斯卡医学院, 斯德哥尔摩 17164

通信作者: 黄湘雅, Email: hxiangya@mail.sysu.edu.cn



黄湘雅

【摘要】 上颌后牙区域骨量严重不足时, 上颌窦底提升术是一种常用且可靠的骨增量技术, 但该手术操作困难、技术敏感性高, 常发生窦膜穿孔、出血和感染等并发症。近年来, 计算机视觉、计算机辅助设计和3D打印等数字化技术及人工智能(AI)应用于上颌窦底提升术的术前设计、手术流程和术后管理等多个环节, 有效地提高手术效果, 减少术后并发症。本文将总结和回顾上颌窦底提升术的数字化工作流程, 介绍数字化技术和AI在上颌窦底提升术的临床应用。

【关键词】 窦底增高术; 数字技术; 3D打印; 计算机辅助设计; 人工智能

【基金项目】 国家自然科学基金(81970974); 广东省财政高水平医院建设专项资金项目(174-2018-XMZC-0001-03-0125/D-04)

【引用著录格式】 张辉, 蔡敏, 黄湘雅. 数字化技术和人工智能在上颌窦底提升术的临床应用[JOL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2023, 17(4): 244-252.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2023.04.003

Clinical application of digital technology and artificial intelligence in maxillary sinus floor augmentation

Zhang Hui¹, Cai Min^{1,2}, Huang Xiangya¹

¹Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangzhou 510055, China; ²Karolinska Institutet, Stockholm 17164, Sweden

Corresponding author: Huang Xiangya, Email: hxiangya@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Maxillary sinus floor augmentation is a commonly used and reliable bone augmentation technique when there is severe bone loss in the posterior maxillary region.

However, this procedure is challenging to perform and highly technically sensitive, with potential complications such as sinus membrane perforation, bleeding, and infection. With the rapid advancement of digital technology, various digital techniques such as computer vision, computer-aided design, 3D printing and artificial intelligence have been applied to multiple aspects of preoperative planning, surgical procedures, and postoperative management in sinus floor elevation surgery. These digital technologies have effectively improved surgical outcomes and reduced postoperative complications. In this article, we provided an introduction of the digital workflow of maxillary sinus floor elevation surgery, and presented the research progress and clinical application of digital technology and artificial intelligence in maxillary sinus floor external elevation surgery.

【Key words】 Sinus floor augmentation; Digital technology; Printing, three - dimensional; Computer - aided design; Artificial intelligence

Fund programs: National Nature Science Foundation of China (81970974); Guangdong Financial Fund for Highcaliber Hospital Construction (174-2018-XMZC-0001-03-0125/D-04)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2023.04.003

种植体支持的义齿为牙列缺失提供了有效的治疗手段。然而, 在上颌后牙区域由于可用牙槽骨体积减小、上颌骨后部萎缩、上颌窦气化和上颌牙龈异常增生等因素阻碍了种植体的放置, 这些情况可以通过上颌窦底提升术(sinus floor augmentation)来解决, 包括经牙槽嵴顶入路(内提升)和侧壁开窗入路(外提升)两种术式^[1], 以增加上颌后牙区牙槽骨体积, 从而实现种植体植入。但是, 由于上颌窦解剖结构复杂, 上颌窦底提升术中常发生窦膜穿孔、出血和感染等并发症, 且该手术通常由医生自由手操作, 技术敏感性高, 极大地影响了治疗预后^[2]。近年来, 随着计算机信息学技术的蓬勃发展, 数字化

技术和人工智能(artificial intelligence, AI)在上颌窦底提升术的术前诊断、治疗设计、手术操作和术后管理全过程中均发挥了重要作用。本文将着重回顾和总结数字化技术和AI在上颌窦底提升术的临床应用,介绍上颌窦底提升术的数字化工作流程,为改良上颌窦底提升术提供现代化的治疗策略。

一、数字化技术用于上颌窦底提升术的术前诊断

Tatum^[3]和Boyne等^[4]在20世纪80年代发表了侧窗入路提升上颌窦底的术式,现已成为上颌后牙区骨量不足病例的临床常用术式。侧窗入路的上颌窦底提升术^[1],即上颌窦底外提升术,包括在上颌窦的外侧壁打开骨窗,提升上颌窦内衬黏膜(Schneiderian膜),将移植材料填充到产生的空腔中,并用可吸收的胶原膜覆盖外侧窗口等步骤。Summers^[5]在1994年提出了经牙槽嵴顶入路的上颌窦底提升术,即上颌窦底内提升术,具有手术创伤小、手术时间短等优点,适用于上颌窦下方牙槽骨剩余高度高于4 mm的患者。虽然两种术式^[1]的上颌窦底提升术均具有稳定有效的临床疗效,但是窦膜穿孔、出血和感染等并发症仍然常见。术前使用锥形束CT(cone-beam computed tomography, CBCT)进行诊断和设计,可为外科医生提供更详细的手术部位三维视图,有助于更精确地计划手术方案,有效降低手术并发症^[6]。随着AI和计算机视觉技术(computer vision)的迅速发展,上颌窦底提升术的术前诊断和诊疗设计流程也更加趋向于标准化和自动化。

1. 上颌窦解剖形态的数字化诊断

(1)上颌窦和牙槽嵴解剖特征:CBCT影像可提供上颌窦和周围结构的详细信息,获得二维成像技术无法检测的三维解剖特征,例如与剩余牙槽嵴相邻的上颌窦形态,包括上颌窦外侧壁厚度、上颌窦底部宽度、上颌窦间隔、上颌窦口和副孔等。此外,还可通过CBCT计算剩余牙槽骨骨密度和体积,测量Schneiderian膜厚度,分析邻牙健康状态等指标,用以评估是否符合手术适应证,从而选择合适的上颌窦底提升术式。目前,AI系统对计算机辅助诊断的研究已有广泛报道,例如检测根尖周病变范围、下颌神经管位置、种植体型号等^[7]。基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)算法的下颌神经管检测成功率为97.9%,而对上颌窦的检出率仅为66.4%,可见适用上颌窦检测的AI系统仍待完善^[7]。需要注意的是,上颌窦区的CBCT常监测到与目标适应证无关的附带发现,如鼻部肿瘤、息肉和异常

上颌窦尺寸等,这将影响治疗计划的选择,也面临着更高术后并发症的可能。因此,开发上颌窦区的自动化分析AI系统将有效推进上颌窦区手术的标准化诊断和治疗决策。

(2)与手术相关的窦性解剖异常:在上颌窦底提升术之前使用CBCT成像评估窦间隔、动脉和假性囊肿等窦性解剖异常,对预防窦膜穿孔、降低术中出血等并发症非常重要。Schneiderian膜穿孔是上颌窦底外提升手术最常见的并发症,其发生率高达25%~60%^[1,8],窦间隔的存在、上颌窦黏膜增厚、上颌窦外侧壁过厚和上颌窦底过窄等解剖特征与窦膜穿孔的发生相关^[9]。在窦膜未穿孔的情况下,植入物边缘骨丧失高度为(0.6±0.8) mm,而窦膜穿孔后骨丧失高度增加至(0.9±0.9) mm^[9]。Schneiderian膜和窦间隔的距离越近,窦间隔越薄,窦膜穿孔的发生率越高^[10]。为自动检测异常窦性解剖结构, Jung等^[11]和Hung等^[12]学者均开发了基于CBCT图像的AI卷积神经网络模型,可以对上颌窦的病变自动分割识别,包括上颌窦黏膜增厚和黏液滞留囊肿等,与手动测量分析的结果差异没有统计学意义。

(3)上颌窦的血管系统:发生于上牙槽后动脉(posterior superior alveolar artery, PSAA)手术损伤的出血是上颌窦底外提升术的第二常见并发症^[13]。PSSA及其分支经常横向穿过上颌窦前壁的手术治疗区域,因此掌握上颌窦前壁动脉的解剖结构对预防术中出血十分关键。为确定最适合观察上颌窦前壁动脉走行的CT图像三维重建技术, Kawai等^[14]研究了不同数字化重建技术对上颌窦动脉观察的适用性,发现基于最大强度投影(MIP)的数字化三维重建程序具有97.9%的总体准确度,在38.2%的患者扫描图像中观察到上颌窦前壁血管。Akçay等^[13]报道了一个基于CBCT的PSAA参考平面,该平面通过上颌牙槽突上最深凹陷处及上颌骨外侧壁轮廓和颧骨顶点处的双侧交点,且与牙槽骨吸收程度无关,该参考平面以下的区域可作为上颌窦底外提升手术中的安全入路,可保持PSAA的完整性,避免术中出血。应用数字化技术分析上颌窦内的血管解剖结构,不仅利于减少术中出血,还能保存PSAA等供血血管,有助于术区移植骨的血管化和骨结合。

2. 上颌窦功能的数字化模拟评估:当使用自体骨或可吸收材料用于骨增量时,存在移植物吸收和预期移植物体积减小等风险^[1]。以往研究认为,鼻腔内的呼吸气流对上颌窦移植物区域具有机械刺激

作用,或与移植物体积减小相关,但缺乏定量研究结果^[15]。数字化技术的发展使上颌窦底提升术的定量研究成为可能。Li等^[16]应用数字化建模技术,使用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)算法对不同呼吸条件下的窦性流体运动进行数值模拟,发现窦底压力和壁面剪切应力随着入口流速的增加而增加,但这些机械刺激的强度仍然保持在可忽略不计的水平,该研究量化了上颌窦底的壁面剪应力,提示呼吸引起的压力对窦底和升高植骨的影响有限。通过这种数字化模拟技术,可用于构建患者的个性化模型,将气道中的气流特性与上颌窦底提升的实际效果相联系。Deng等^[17]报道了一种改良内窦抬高手术步骤,将上颌窦底提升与窦黏膜骨膜剥离手术相结合,并建立了三维有限元模型来动态模拟手术过程中窦底黏膜的应力变化,发现改良内窦提升术可部分降低上颌窦底膜破裂的风险。

二、使用数字化虚拟患者进行术前诊疗设计

1. 重建数字化患者:由CBCT扫描、数字化口腔扫描和面部扫描获得的数据可以通过计算机进行集成、重建和虚拟现实模拟,生成数字化患者,便于在实际手术之前进行诊疗设计^[18-19]。除了常规使用的CBCT数据外,亦有学者使用患者的磁共振成像(MRI)数据进行虚拟种植规划和数字化导板引导的上颌窦底内提升手术,证实使用MRI进行术前设计和引导种植手术的可行性^[20]。与传统影像学数字化重建相比,基于MRI数字化设计,能够完整提供口腔内软硬组织的详细信息,减少电离辐射。

2. AI辅助的数字化种植设计:数字化种植设计已在临床上广泛应用,口腔医生可基于虚拟患者的软硬组织信息,以最终修复效果为导向,设计数字诊断蜡型和临时修复体,模拟最终修复体的形态、大小和位置,重建牙列和颌位关系,并根据修复体的最终位置放置虚拟种植体。根据上述手术规划,医生可以设计和制作数字化种植导板,从而精确引导种植体植入^[19,21-22]。目前,用于种植体设计优化和预后预测的AI模型仍处于开发阶段,但已显示出巨大潜力。Chen等^[23]使用AI程序辅助种植体设计,该程序可通过检测参考点自动识别种植体区域的解剖结构,确定植入物的理想位置,体外研究显示植体的肩部偏差为 (0.80 ± 0.32) mm,误差值低于完全引导种植导板的临床安全距离,表明其临床可靠性。Mangano等^[24]不使用传统软件的数字化设计,

使用增强现实(augmented reality, AR)技术进行种植规划设计和引导手术。操作员穿戴AR设备后(HoloDentist[®]),可加载由AI系统获取的患者解剖结构全息模型,通过简单的手势粗略定位植体位置后,AI系统将结合剩余牙槽骨体积、邻牙位置和软组织形态等综合因素,自动优化种植体设计,提供植体的理想位置、倾斜度和深度,并预设最终修复体。在该数字化流程中,临床医生可以在真实的3D环境中规划种植体,无须使用任何放射引导手术软件,并具有可接受的临床精度,但仍然需要更大样本的患者来验证。Revilla-León等^[25]的Meta分析结果显示,AI模型更能优化种植体设计,与有限元模型相比,可将种植体-骨界面处的应力减少36.6%。预测骨整合或植入成功的AI模型的准确率从62.4%到80.5%不等^[25-28],但方法学之间存在巨大差异,难以定量比较。目前,应用AI辅助上颌窦底提升治疗设计和预后预测的研究相对有限。Murata等^[29]将深度学习系统应用于数字化曲面断层片诊断上颌窦炎,发现AI系统的准确率为87.5%,高于牙科住院医生的诊断准确率。未来仍然需要开发适用于上颌窦区相关的AI模型,深入研发相关数字化技术,以进一步促进大数据交流和使用^[30]。

3. 数字化图像测量骨增量材料体积:通过测量CBCT图像和其他数据集生成的数字化患者图像,可以计算出上颌窦底提升所需要的骨增量材料体积,避免过度填充和堵塞上颌窦口^[30]。Mangano等^[31]通过计算机辅助设计与制作(computer aided design/computer aided manufacturing, CAD/CAM)技术生成了用于上颌窦底提升的个性化骨增量移植材料,术前将定制的羟基磷灰石(HA)块切割成所需的形状,术中可精确植入上颌窦底提升骨腔中,术后2年随访良好,未观察到并发症。Hamd等^[32]开发了一种机器学习算法以预测上颌窦体积,通过患者年龄、性别和上颌窦的前后、垂直向的影像测量值参数,可准确地预测上颌窦容积,左右两侧上颌窦的误差均小于2 mL。

4. 手术模拟和临床前培训:使用计算机辅助的快速制造技术(computer-aided rapid prototyping, CARP)可以将患者的解剖结构复制为物理模型,用于术前模拟。Tuce等^[22]基于患者上颌骨CBCT数据开发了用于设计和制造手术导板的数字模型,该模型可用于术前模拟练习,或作为与患者讨论手术过程的视觉辅助工具。数字化技术在上颌窦底提升术

相关的临床前教育亦可发挥重要作用,屈依丽等^[33]报道了数字化技术在上颌窦底外提升术领域临床教学中的应用,指导医学生使用种植导板软件,设计具有理想开窗范围的数字化导板,提升了学生的学习积极性。

三、数字化技术引导的上颌窦底提升术

当牙槽骨剩余骨量不少于4 mm时,临床常用经牙槽嵴顶入路的上颌窦底内提升术。数字化技术引导的上颌窦底内提升术已得到广泛报道和临床应用,3年成功率为98.53%~100%^[34-35]。医生在种植软件上模拟植入位置,测量牙槽嵴到上颌窦底的距离和计划提升的高度,制作个性化的手术导板,可精确控制工作深度,降低膜穿孔的风险。Pozzi等^[35]开展了一项计算机辅助上颌窦底内提升术的前瞻性研究,66例患者接受了治疗并进行了3年的随访,平均骨高度提升了(6.4±1.6) mm,随访期内未发生生物或机械并发症,所有患者均报告疼痛程度较低,牙周参数正常。2023年,有学者报道了动态导航技术引导的上颌窦底内提升术,认为动态导航技术引导的准确性与静态引导手术相当或更高,并且优于徒手种植手术的准确性,减少手术相关并发症的发生^[36]。

当患者上颌窦下的牙槽骨剩余骨量不足4 mm时,经牙槽嵴顶入路的上颌窦底内提升存在易发窦膜穿孔、种植体初期稳定性差、窦底可提升高度少等缺点,此时上颌窦底外提升术是更可靠的术式选择,即上颌窦侧窗入路、植骨、同期或延期植入种植体。Pjetursson等^[37]的Meta分析结果显示,一期上颌窦底外提升术的3年生存率为96.3%~99.8%。关于种植体植入的时机,以往研究建议采用二期上颌窦底外提升术,即在术后4~12个月延迟植入种植体^[38];而近年临床证据表明,即使在牙槽骨剩余高度小于3 mm的情况下,也可以安全地进行一期上颌窦底提升和即刻种植体植入,但需要确保种植体的初期稳定性^[39]。相比传统的侧窗入路技术,基于数字化的上颌窦手术方式可精确定位侧窗位置,清晰确定上颌窦侧壁拟开窗的前后和上下边界,实现在理想的位置进行截骨、开窗,同时准确标记窦间隔和窦内血管,减少手术并发症,提高种植体的初期稳定性^[40-42]。

1. 使用数字化侧窗导板实现精确截骨: Mandelaris等^[43-44]于2008年首次描述了使用3D成像和CAD/CAM技术制作上颌窦底外提升手术导板的

治疗流程。该研究中,8例患者成功地使用截骨导板进行窦底提升手术,其中有4例患者采用一期手术方式同期植入种植体,术前根据种植体植入位置确定窦底提升的范围,导板指引下的术后切口位置与术前模拟截骨位置之间的误差小于1 mm,证实使用数字化导板提高了手术的精度和速度^[43]。该研究的不足之处在于缺少数字化口腔内扫描,可能会降低手术导板的准确性,并且其流程需要分别使用截骨导板和种植导板,程序较为复杂。Zaniol等^[45]提出了改良低位窗口窦提升技术,即根尖截骨线位于窦底水平以上6 mm处,使用窦底提升导板来测试该技术的精确度,证实该技术未发生窦膜撕裂或其他手术并发症,手术创伤小,患者满意度高。

针对上颌窦的异常解剖结构,可精确设计数字化导板的外形和定位点,实现有效避让重要解剖结构,从而减少并发症的发生^[46]。Wang等^[41]针对上颌窦中隔,开发了一种结合种植体植入和上颌窦侧窗入路的改良手术导板,证实这种导板可以提高手术精确性,缩短手术时间。林锋等^[47]使用数字化导板引导侧壁开窗上颌窦底提升手术,患者缺失区牙槽骨高度小于2 mm,上颌窦底壁见不完全骨性分隔,利用数字化导板可减少开窗范围,避免损伤窦间隔结构。Osman等^[48]对两组患者进行了一期上颌窦底外提升术,分别采用CAD/CAM生成的侧窗导板辅助入路和标准侧窗入路技术,尽管导板组的10例患者中有3例出现窦间隔,但所有侧窗导板都显示出高度的匹配性和准确性,成功实施了上颌窦底提升术,仅有1例在截骨侧窗的下缘发生穿孔;而非导板组有3例发生穿孔,其中2例因存在复杂的窦间隔结构增加了手术难度,另外1例在截骨侧窗的上缘发生了动脉支流出血。该研究证实,即使具有大的气化窦或异常牙槽嵴形态等解剖结构,数字化导板引导的一期上颌窦底提升术仍然具有良好的窦膜提升效果,可有效避免窦膜穿孔。Goodacre等^[49]发表了利用侧窗导板勾勒骨内血管形态的系列病例报告,数字化导板可准确识别和保存上颌窦动脉,降低了术中出血风险。

2. 数字化导板的功能化设计:除了避让解剖结构外,亦有研究报道了不同功能的数字化导板设计。Sun等^[40]报道在数字化导板上增加1个可拆卸的窦膜平台,作为窦膜稳定器,支撑保护窦膜,该窦膜平台通过互锁装置连接在数字化导板上,旨在延伸到窦内支撑提升的窦膜,并在植入物截骨准备过

程中保护窦膜。该导板一方面可以帮助临床医生勾勒出侧壁骨窗的轮廓,进一步帮助窦膜的稳定和保护,提高一期上颌窦底提升术的精确性,降低窦膜穿孔的风险。另一方面,该导板同期合并了种植手术模板,可提供相对于植入部位更好的窗口定位,从而改善手术的整体结果。考虑到导板就位可能受到上颌突等解剖位置干扰,Yu等^[50]报道了一种可组装的隔膜导向器和侧窗导板,二者使用同一个牙支持式导板基底,可于术前在口腔内进行试模,验证模板的准确性,提高手术效率和安全性。Teixeira等^[51]也设计了类似的磁性可堆叠手术导板,用于定位窦间隔的准确位置,优化侧路开窗的定位。

由于需要使用多个数据集和软件,数字化导板引导的窦底提升手术规划、设计和导板制作所需的时间有所增加,但同时也降低了术中并发症的发生率,从而减少了手术时间和创伤。Cho等^[52]为简化制作流程的复杂性,修改了现有工艺,仅保留侧窗的近中、远中和下边界,用动态导航系统定位侧窗上界,从而大幅减小了导板的体积。随着数字化导板在种植手术中的应用日益增多,现有大量研究证实使用种植导板可以提高种植体植入精确度、缩短手术时间、降低手术创伤,但目前与上颌窦底外提升术相关的数字化导板的临床研究仍然较少^[53-55]。与种植导板相似,上颌窦底外提升术数字化导板的口内定位和固定方式可能会对截骨或植入的精确度造成影响。据报道,黏膜支持式种植导板引导手术与牙支持式种植导板相比,植入位置与预期位置的偏差更大^[56-57]。目前已发表的研究大部分使用牙支持式数字化导板,较黏膜支持式的导板更精确。但是,全程引导种植导板的一个缺点是术中不能根据病情变化而改变导板设计,治疗方案的灵活性较低,且存在术中冷却不足导致骨骼过热等潜在风险。用于上颌窦底外提升术的数字化导板与种植导板同样都属于静态导航系统,制作流程相似,也具有导板体积大、方案灵活性低等缺陷。

3. 动态导航技术提高上颌窦底提升手术的灵活性和可预测性:动态导航系统是一种新型的基于口腔光学扫描技术、CBCT三维成像技术、计算机辅助设计技术和运动追踪技术的数字化技术^[58]。仪器的位置通过光学跟踪系统使用定义的标记进行实时识别,操作者可在屏幕上跟踪仪器的位置和三维规划情况。与种植导板、上颌窦底外提升导板等

静态导航系统不同的是,医生在可视的情况下进行种植体植入,使操作保持可控,便于在手术过程中修改计划。动态导航的另一个优点是,导航软件采用的是开源系统,可以使用任何植入系统,尤其适用于不翻瓣手术。由于不需要使用大体积的导板,动态导航系统在垂直空间有限的情况下也可以使用。通过数字化虚拟设计,可以评估植入区域相邻的解剖结构和可用空间,并提供术前种植体规划的准确性和可行性。通过计算机软件中的轴向、深度引导和预可视化,可以实现准确执行数字规划。Yimarj等^[59]进行的一项随机临床对照实验发现,通过静态和动态导航组引导植入的2个植体间的平行度偏差相似,在植入物平台处和顶点处的平均3D偏差和角度偏差差异均无统计学意义,达到相似的临床效果。

目前,在上颌窦底外提升术中应用动态导航技术的报道十分有限。Cho等^[52]采用数字化侧窗导板定位骨窗的下界和侧界,结合应用动态导航系统定位骨窗的上界,大幅度减小了导板体积,操作的灵活性增加,认为该术式更为精确、安全,但该研究中数字化侧窗导板上界的定位基于动态导航系统,无法覆盖牙尖到高于颊前庭的定点,而基于CBCT设计的数字化导板可覆盖全部的软硬组织。Bishbish等^[60]报道了动态导航系统引导的侧窗入路上颌窦底外提升术的手术流程,同期植入了种植体,该研究设计了4个直径1.5 mm的植体作为侧窗的设计边界,植体的深度代表术中预期截骨的深度,不额外使用数字化侧窗导板。相比于静态导航技术,动态导航技术更能提高种植治疗的可预期性,降低了一期上颌窦底外提升术的技术敏感性。但是,动态导航系统的设备及软件费用高昂,且操作者需要进行专门培训,初期学习曲线较为陡峭。

数字化技术应用至上颌窦底提升术的文献报道汇总见表1。尽管数字化导板在上颌窦底外提升术的应用仍存有术前准备繁琐、流程复杂等缺陷,但不可否认的是,数字化导板可以有效地提高手术精确度,避让重要解剖结构,从而减少手术创伤和并发症的发生。结合动态导航技术,有望弥补数字化导板体积庞大、治疗方案灵活性低等缺陷,改进上颌窦底外提升术的数字化工作流程,进一步提高手术的精确性和可预测性。

4. 数字化辅助的上颌窦底提升术与多学科联合诊疗:上颌窦区域解剖形态复杂,设计和管理上

表1 数字化技术应用于上颌窦底提升术的文献报道

文献作者	报道年份	手术方式	剩余牙槽嵴高度	数字化技术	数字化导板功能	支持方式	术后效果
Mandelaris 等 ^[43]	2009	一期(4/8) 二期(4/8)	未描述	CAD,3D打印(DLP)	定位骨窗边界,或定位种植位点	牙支持式	截骨位置精度<1 mm 未见并发症
Zaniol 等 ^[45]	2018	一期(13/22) 二期(15/22)	≤4 mm(14/22) >4 mm(8/22)	CAD,3D打印	定位骨窗边界	牙支持式	未见并发症
Osman 等 ^[48]	2018	一期(导板组 10/20, 非导板组 10/20)	4~6 mm	CAD,3D打印(FDM)	定位骨窗边界和窦间隔	黏膜支持式,微型钛螺钉 固定	导板组:1/10穿孔 非导板组:3/10穿孔
Goddacre 等 ^[49]	2018	一期(14/14)	未描述	CAD,3D打印(DLP)	定位骨窗边界和骨内血管	牙支持式(12/14) 黏膜支持式(2/14)	未见并发症
Sun 等 ^[40]	2018	一期(1/1)	5~7 mm	口内光学扫描,CAD,3D 打印	定位骨窗边界和种植位点, 保护黏膜	牙支持式	未见并发症
Tuce 等 ^[22]	2019	制备上颌窦底外提升 教学模型	未描述	CAD,3D打印(FDM)	定位骨窗边界	牙支持式	术前练习、医患沟通
Strbac 等 ^[42]	2020	一期(1/1)	4~5 mm	口外模型光学扫描,CAD, 3D打印	定位骨窗边界和种植位点	牙支持式	未见并发症
屈依丽等 ^[33]	2020	二期(1/1)	1 mm,右侧上颌窦 存在囊肿	口内光学扫描,CAD,3D 打印	定位骨窗边界,避开上牙槽 前动脉	牙支持式	未见并发症
Cho 等 ^[32]	2020	一期(5/5)	≤4 mm	口内光学扫描,CAD,3D 打印(DLP);动态导航技 术定位骨窗上界	定位骨窗侧边界、下边界和 种植位点	牙支持式	未见并发症
Flügge 等 ^[30]	2020	未描述	未描述	口外模型光学扫描,CAD, 3D打印	定位种植位点	牙支持式	虚拟手术
Wang 等 ^[41]	2021	一期(1/1)	未描述	口外模型光学扫描,CAD, 3D打印	定位骨窗边界、窦间隔和种 植位点	牙支持式	未见并发症
Teixeira 等 ^[51]	2021	未描述	未描述	口内光学扫描,CAD,3D 打印	定位骨窗边界和窦间隔,导 板磁性连接	牙支持式	未描述
林锋等等 ^[47]	2022	二期(1/1)	<2 mm	口内光学扫描,CAD,3D 打印	定位骨窗边界和窦间隔	牙支持式	未见并发症
Bishbish 等 ^[60]	2022	一期(1/1)	4 mm	口内光学扫描,动态导航 系统定位骨窗边界	未使用导板	未描述	未见并发症
Yu 等 ^[50]	2023	二期(1/1)	未描述	口内光学扫描,CAD,3D 打印	定位骨窗边界和窦间隔,导 板螺栓连接	牙支持式	未见并发症

注:CAD(computer-aided design)为计算机辅助设计;DLP(digital light processing)为数字光处理技术;FDM(fused deposition modeling)为熔融沉积制造工艺。

颌窦底提升术还需要牙体牙髓病科、牙周病科、口腔颌面外科和耳鼻喉科等多学科合作诊疗。例如,上颌磨牙腭根炎症时,由于与上颌窦底距离接近,显微根尖手术面临较大临床挑战。有学者报道了使用上颌窦底提升术治疗上颌磨牙腭根根尖周病变,在非手术根管再治疗的基础上,从颊侧入路进行颊根根尖手术,同期上颌窦底提升术和腭根根尖切除术,2年随访良好,提示了上颌窦底提升术辅助治疗上颌磨牙根尖周疾病的可能性^[61]。结合数字化技术,如果能在根尖外科手术中结合使用数字化侧窗导板,或可高效定位入路位置,缩短手术时间。对于具有慢性根尖周病变的患牙,上颌窦底提升术的成功率降低至81.5%^[62],这可能与根尖病损区清创程度和手术的复杂程度相关,而数字化辅助的手术有望减轻并发症,从而提高手术成功率。例如Oh等^[63]通过计算机引导进行无翻瓣的牙槽嵴入路上颌窦底提升术,同期切除上颌窦的假性囊肿,减小手术的侵入性,使围手术期发生并发症的风险更低。

四、展望

随着数字化技术在口腔诊疗应用的迅速发展,上颌窦底提升术的数字化工作流程提升了诊疗的精确性和可预测性。在诊疗设计方面,尽管基于AI的自动化CBCT图像分割已经得到广泛应用,但仍缺少提取上颌窦重要特征信息、优化治疗设计和预后评估的数字化模拟技术。数字化导板、动态导航系统等数字化技术有效降低了上颌窦底提升术的手术难度,减少并发症的发生,但仍需要进一步优化数字化工作流程,开发数字化的骨增量材料,进行多中心、随机和前瞻性临床研究。先进的数字化技术和AI必将在医教研等领域得到更加广泛的应用,为口腔医学的精准医疗和智能医疗提供现代化保障。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Lundgren S, Cricchio G, Hallman M, et al. Sinus floor elevation procedures to enable implant placement and integration: Techniques, biological aspects and clinical outcomes [J]. *Periodontol 2000*, 2017, 73 (1) : 103 - 120. DOI: 10.1111/prd.12165.
- [2] Molina A, Sanz-Sánchez I, Sanz-Martín I, et al. Complications in sinus lifting procedures: Classification and management [J]. *Periodontol 2000*, 2022, 88 (1) : 103 - 115. DOI: 10.1111/prd.12414.
- [3] Tatum H Jr. Maxillary and sinus implant reconstructions [J]. *Dent Clin North Am*, 1986, 30 (2) : 207 - 229. DOI: 10.1016/S0011-8532(22)02107-3.
- [4] Boyne PJ, James RA. Grafting of the maxillary sinus floor with autogenous marrow and bone [J]. *J Oral Surg*, 1980, 38(8):613-616.
- [5] Summers RB. A new concept in maxillary implant surgery: The osteotome technique [J]. *Compendium*, 1994, 15(2) : 152, 154-156.
- [6] Morgan N, Meeus J, Shujaat S, et al. CBCT for diagnostics, treatment planning and monitoring of sinus floor elevation procedures [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(10):1684. DOI: 10.3390/diagnostics13101684.
- [7] Kurt Bayrakdar S, Orhan K, Bayrakdar IS, et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone - beam computed tomography images [J]. *BMC Med Imaging*, 2021, 21 (1) : 86. DOI: 10.1186/s12880-021-00618-z.
- [8] Raghoobar GM, Batenburg RH, Timmenga NM, et al. Morbidity and complications of bone grafting of the floor of the maxillary sinus for the placement of endosseous implants [J]. *Mund Kiefer Gesichtschir*, 1999, 3(Suppl 1) : S65-S69. DOI: 10.1007/PL00014520.
- [9] Irinakis T, Dabuleanu V, Aldahlawi S. Complications during maxillary sinus augmentation associated with interfering septa: A new classification of septa [J]. *Open Dent J*, 2017, 11: 140-150. DOI: 10.2174/1874210601711010140.
- [10] Çakur B, Sümbüllü MA, Durna D. Relationship among Schneiderian membrane, Underwood's septa, and the maxillary sinus inferior border [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2013, 15 (1) : 83-87. DOI: 10.1111/j.1708-8208.2011.00336.x.
- [11] Jung SK, Lim HK, Lee S, et al. Deep active learning for automatic segmentation of maxillary sinus lesions using a convolutional neural network [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11 (4) : 688. DOI: 10.3390/diagnostics11040688.
- [12] Hung KF, Ai QYH, King AD, et al. Automatic detection and segmentation of morphological changes of the maxillary sinus mucosa on cone-beam computed tomography images using a three-dimensional convolutional neural network [J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26 (5) : 3987-3998. DOI: 10.1007/s00784-021-04365-x
- [13] Akçay H, Kalabalık F, Tatar B. Evaluation of the posterior superior alveolar artery location and diameter with a newly defined stable plane [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2023, 52 (4) : 503-509. DOI: 10.1016/j.ijom.2021.03.017.
- [14] Kawai M, Nagao T, Katsumata A. Visibility of vascular vessels on anterior wall of maxillary sinus in 3D reconstructed dental CBCT images [J]. *J Oral Maxillofac Surg Med Pathol*, 2022, 34 (6) : 719-723. DOI: 10.1016/j.ajoms.2022.06.006.
- [15] Kurbel S, Radić R, Kristek B, et al. Atmospheric pressure as a force that fills developing bones with marrow and air [J]. *Med Hypotheses*, 2004, 62(4) : 529-532. DOI: 10.1016/j.mehy.2003.

- 12.028.
- [16] Li Q, Wang ZY, Wang C, et al. Characterizing the respiratory-induced mechanical stimulation at the maxillary sinus floor following sinus augmentation by computational fluid dynamics [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 885130. DOI: 10.3389/fbioe.2022.885130.
- [17] Deng Y, Tong C, Gao K, et al. Modified internal sinus elevation for patients with low residual bone height: A retrospective clinical study [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2023, 25(3): 458-472. DOI: 10.1111/cid.13204.
- [18] Pardal-Peláez B, Córdoba-Llorente JR, Belarra-Arenas C. Sinus lift through the use of a surgical guide: A case report [J]. *Int J Comput Dent*, 2020, 23(4): 377-386.
- [19] Joda T, Ferrari M, Gallucci GO, et al. Digital technology in fixed implant prosthodontics [J]. *Periodontol 2000*, 2017, 73(1): 178-192. DOI: 10.1111/prd.12164.
- [20] Flügge T, Ludwig U, Hövener JB, et al. Virtual implant planning and fully guided implant surgery using magnetic resonance imaging—Proof of principle [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2020, 31(6): 575-583. DOI: 10.1111/clr.13592.
- [21] Surovas A. A digital workflow for modeling of custom dental implants [J]. *3D Print Med*, 2019, 5(1): 9. DOI: 10.1186/s41205-019-0046-y.
- [22] Tuce RA, Arjoca S, Neagu M, et al. The use of 3D-printed surgical guides and models for sinus lift surgery planning and education [J]. *J 3D Print Med*, 2019, 3(3): 145-155. DOI: 10.2217/3dp-2019-0014.
- [23] Chen Z, Liu Y, Xie X, et al. Influence of bone density on the accuracy of artificial intelligence-guided implant surgery: An *in vitro* study [J]. *J Prosthet Dent*, 2022; S0022-3913(21)00414-5. DOI: 10.1016/j.prosdent.2021.07.019.
- [24] Mangano FG, Admakin O, Lerner H, et al. Artificial intelligence and augmented reality for guided implant surgery planning: A proof of concept [J]. *J Dent*, 2023, 133: 104485. DOI: 10.1016/j.jdent.2023.104485.
- [25] Revilla - León M, Gómez - Polo M, Vyas S, et al. Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review [J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 129(2): 293-300. DOI: 10.1016/j.prosdent.2021.05.008.
- [26] Moayeri RS, Khalili M, Nazari M. A hybrid method to predict success of dental implants [J]. *Int J Adv Comput Sci Appl*, 2016, 7(5): 1-6. DOI: 10.14569/IJACSA.2016.070501.
- [27] Oliveira ALI, Baldisserotto C, Baldisserotto J. A comparative study on support vector machine and constructive RBF neural network for prediction of success of dental implants [C]//Sanfeliu A, Cortés ML. *Progress in Pattern Recognition. Image Analysis and Applications, Proceedings*, 2005: 1015-1026. DOI: 10.1007/11578079_104.
- [28] Papantopoulos G, Gogos C, Housos E, et al. Prediction of individual implant bone levels and the existence of implant “phenotypes” [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2017, 28(7): 823-832. DOI: 10.1111/clr.12887.
- [29] Murata M, Ariji Y, Ohashi Y, et al. Deep-learning classification using convolutional neural network for evaluation of maxillary sinusitis on panoramic radiography [J]. *Oral Radiol*, 2019, 35(3): 301-307. DOI: 10.1007/s11282-018-0363-7.
- [30] Yeung AWK, Hung KF, Li DTS, et al. The use of CBCT in evaluating the health and pathology of the maxillary sinus [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(11): 2819. DOI: 10.3390/diagnostics12112819.
- [31] Mangano F, Zecca P, Pozzi-Taubert S, et al. Maxillary sinus augmentation using computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) technology [J]. *Int J Med Robot*, 2013, 9(3): 331-338. DOI: 10.1002/res.1460.
- [32] Hamd ZY, Aljuaid H, Alorainy AI, et al. Machine learning as new approach for predicting of maxillary sinus volume, a sexual dimorphic study [J]. *J Radiat Res Appl Sci*, 2023, 16(2): 100570. DOI: 10.1016/j.jrras.2023.100570.
- [33] 屈依丽, 雒琪玥, 张歆缘, 等. 数字化技术在上颌窦底提升术领域临床教学改革中的应用现状与展望 [J]. *中国临床新医学*, 2020, 13(4): 323-326. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3806.2020.04.01.
- [34] An X, Lee C, Fang Y, et al. Immediate nonfunctional loading of implants placed simultaneously using computer-guided flapless maxillary crestal sinus augmentation with bone morphogenetic protein-2/collagen matrix [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2019, 21(5): 1054-1061. DOI: 10.1111/cid.12831.
- [35] Pozzi A, Moy PK. Minimally invasive transcresal guided sinus lift (TGSL): A clinical prospective proof-of-concept cohort study up to 52 months [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2014, 16(4): 582-593. DOI: 10.1111/cid.12034.
- [36] Wu BZ, Ma FF, Sun F. Analysis of the accuracy of a dynamic navigation system when performing dental implant surgery with transcresal sinus floor elevation: A pilot study [J]. *J Dent Sci*, 2023. DOI: 10.1016/j.jds.2022.12.014.
- [37] Pjetursson BE, Tan WC, Zwahlen M, et al. A systematic review of the success of sinus floor elevation and survival of implants inserted in combination with sinus floor elevation [J]. *J Clin Periodontol*, 2008, 35(8 Suppl): 216-240. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2008.01272.x.
- [38] Jensen OT, Shulman LB, Block MS, et al. Report of the sinus consensus conference of 1996 [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 1998, 13(Suppl): 11-32.
- [39] Virnik S, Cueni L, Kloss-Brandstätter A. Is one-stage lateral sinus lift and implantation safe in severely atrophic maxillae? Results of a comparative pilot study [J]. *Int J Implant Dent*, 2023, 9(1): 6. DOI: 10.1186/s40729-023-00471-5.
- [40] Sun TC, Negreiros WM, Jamjoom F, et al. Application of 3d-printed implant-osseous-membrane guide for one-stage sinus floor elevation: A clinical report [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2020, 35(6): 1203-1208. DOI: 10.11607/jomi.8396.
- [41] Wang T, Ye L, Sun Y, et al. Fabricating a surgical template for

- guiding sinus floor elevation in the maxillary sinus septa with simultaneous implant placement: A dental technique [J]. *J Prosthet Dent*, 2021, 6(129): 840-843. DOI: 10.1016/j.prosdent.2021.07.012.
- [42] Strbac GD, Giannis K, Schnappauf A, et al. Guided lateral sinus lift procedure using 3-dimensionally printed templates for a safe surgical approach: A proof-of-concept case report [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2020, 78(9): 1529-1537. DOI: 10.1016/j.joms.2020.04.042.
- [43] Mandelaris GA, Rosenfeld AL. Alternative applications of guided surgery: Precise outlining of the lateral window in antral sinus bone grafting [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2009, 67(11 Suppl): 23-30. DOI: 10.1016/j.joms.2009.07.006.
- [44] Mandelaris GA, Rosenfeld AL. A novel approach to the antral sinus bone graft technique: The use of a prototype cutting guide for precise outlining of the lateral wall. A case report [J]. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 2008, 28(6): 569-575. DOI: 10.1016/j.ijom.2008.06.012.
- [45] Zaniol T, Zaniol A, Tedesco A, et al. The low window sinus lift: A cad - cam - guided surgical technique for lateral sinus augmentation: A retrospective case series [J]. *Implant Dent*, 2018, 27(4): 512-520. DOI: 10.1097/id.0000000000000776.
- [46] 章雯, 顾新华. 侧壁开窗上颌窦底提升的骨窗设计研究进展 [J]. *中国口腔种植学杂志*, 2021, 26(5): 334-338. DOI: 10.12337/zgkqzzzz.2021.10.012.
- [47] 林锋, 苏艳君, 李焕, 等. 数字化导板在复杂上颌窦底提升手术的应用 1 例 [J]. *临床口腔医学杂志*, 2022, 38(12): 754-756. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1634.2022.12.014.
- [48] Osman AH, Mansour H, Atef M, et al. Computer guided sinus floor elevation through lateral window approach with simultaneous implant placement [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2018, 20(2): 137-143. DOI: 10.1111/cid.12559.
- [49] Goodacre BJ, Swamidass RS, Lozada J, et al. A 3D - printed guide for lateral approach sinus grafting: A dental technique [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(6): 897 - 901. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.07.014.
- [50] Yu M, Luo Y, Yang X, et al. Application of an assembled surgical guide for lateral approach sinus augmentation and sinus septum management: A technical note [J]. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*, 2023, 124(2): 101307. DOI: 10.1016/j.jormas.2022.10.006.
- [51] Teixeira KN, Sakurada MA, Philippi AG, et al. Use of a stackable surgical guide to improve the accuracy of the lateral wall approach for sinus grafting in the presence of a sinus septum [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2021, 50(10): 1383-1385. DOI: 10.1016/j.ijom.2021.02.023.
- [52] Cho SW, Yang BE, Cheon KJ, et al. A simple and safe approach for maxillary sinus augmentation with the advanced surgical guide [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(11): 3785. DOI: 10.3390/ijerph17113785.
- [53] Derksen W, Wismeijer D, Flugge T, et al. The accuracy of computer-guided implant surgery with tooth-supported, digitally designed drill guides based on CBCT and intraoral scanning. A prospective cohort study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2019, 30(10): 1005-1015. DOI: 10.1111/clr.13514.
- [54] El Kholi K, Lazarin R, Janner SFM, et al. Influence of surgical guide support and implant site location on accuracy of static Computer-Assisted Implant Surgery [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2019, 30(11): 1067-1075. DOI: 10.1111/clr.13520.
- [55] Smitkarn P, Subbalekha K, Mattheos N, et al. The accuracy of single - tooth implants placed using fully digital - guided surgery and freehand implant surgery [J]. *J Clin Periodontol*, 2019, 46(9): 949-957. DOI: 10.1111/jcpe.13160.
- [56] López DAS, García I, da Silva Salomao G, et al. Potential deviation factors affecting stereolithographic surgical guides: A systematic review [J]. *Implant Dent*, 2019, 28(1): 68-73. DOI: 10.1097/id.0000000000000853.
- [57] Naeini EN, Atashkadeh M, de Bruyn H, et al. Narrative review regarding the applicability, accuracy, and clinical outcome of flapless implant surgery with or without computer guidance [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2020, 22(4): 454-467. DOI: 10.1111/cid.12901.
- [58] Gargallo-Albiola J, Barootchi S, Salomé-Coll O, et al. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review [J]. *Ann Anat*, 2019, 225: 1 - 10. DOI: 10.1016/j.aanat.2019.04.005.
- [59] Yimarj P, Subbalekha K, Dhanesuan K, et al. Comparison of the accuracy of implant position for two - implants supported fixed dental prosthesis using static and dynamic computer - assisted implant surgery: A randomized controlled clinical trial [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2020, 22(6): 672-678. DOI: 10.1111/cid.12949.
- [60] Bishbish O, Kan J, Kim YJ. Guided lateral window osteotomy using Dynamic navigation for maxillary sinus augmentation: A novel technique [J]. *J Oral Implantol*, 2023, 49(3): 316-321. DOI: 10.1563/aaid-joi-D-22-00053.
- [61] Azim AA, Wang HH, Serebro M. Selective retreatment and sinus lift: An alternative approach to surgically manage the palatal roots of maxillary molars [J]. *J Endod*, 2021, 47(4): 648-657. DOI: 10.1016/j.joen.2020.08.028.
- [62] Colak S, Demirsoy MS. Retrospective analysis of dental implants immediately placed in extraction sockets with periapical pathology: Immediate implant placement in infected areas [J]. *BMC Oral Health*, 2023, 23(1): 304. DOI: 10.1186/s12903-023-02986-0.
- [63] Oh JH, An X, Jeong SM, et al. Crestal sinus augmentation in the presence of an antral pseudocyst [J]. *Implant Dent*, 2017, 26(6): 951-955. DOI: 10.1097/id.0000000000000691.

(收稿日期: 2023-06-08)

(本文编辑: 王嫒)