

数字化在下颌精准种植中的应用

赵晓敏, 张莹, 张漫, 高小波*

内蒙古医科大学赤峰临床医学院, 内蒙古 赤峰

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月23日

摘要

口腔种植已成为口腔科治疗牙列缺损、牙列缺失最常见的修复方式。随着计算机技术的飞速发展, 数字化技术已深度融入种植修复的各个环节。本文从数字化口腔种植视角出发, 系统综述口腔下颌种植与数字化技术结合应用的优势及临床效果, 阐明该技术对口腔临床诊疗的影响, 为推动下颌精准种植技术的临床普及与学术发展提供理论依据。

关键词

数字化种植, 种植导板, 导航系统, 口腔种植机器人

The Application of Digitalization in Precise Mandibular Implantation

Xiaomin Zhao, Ying Zhang, Man Zhang, Xiaobo Gao*

Chifeng Clinical Medicine College of Inner Mongolia Medical University, Chifeng Inner Mongolia

Received: Jun. 21st, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

Oral implantation has become the most common restorative method for treating partial and complete tooth loss in the dental field. With the rapid development of computer technology, digital technology has been deeply integrated into every aspect of implant restoration. This article, from the perspective of digital oral implantation, systematically reviews the advantages and clinical effects of the combined application of mandibular implantation and digital technology, clarifies the impact of this technology on clinical diagnosis and treatment in dentistry, and provides a theoretical basis for promoting the clinical popularization and academic development of precise mandibular implantation technology.

*通讯作者。

文章引用: 赵晓敏, 张莹, 张漫, 高小波. 数字化在下颌精准种植中的应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(7): 1381-1386.
DOI: 10.12677/acm.2025.1572137

Keywords

Digitalized Planting, Planting Guide Plate, Navigation System, Oral Implant Robot

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

下颌种植因其解剖结构复杂, 骨组织形态个体差异大, 毗邻重要神经血管(如下牙槽神经、颞孔等), 仅靠自由手种植难度大、风险相对较高。近年来临床中更多应用数字化技术来协助完成更精准、高效的下颌种植。数字化种植技术是在牙齿种植中联合使用种植外科导板, 口内、口外扫描仪、电子面弓、导航系统及机器人等工具的全流程数字化种牙技术, 相对于传统种植技术有着更高的精确性和更少的椅旁操作时间。数字化种植更符合以修复为导向的种植理念, 精准合理的植入能为后期牙冠的修复奠定良好的基础[1]。其高效性、准确性和科学性获得了众多口腔临床工作者和患者的认可。

2. 数字化技术在下颌口腔种植中的应用

2.1. 数字化种植导板

数字化种植导板按照支持方式可分为牙支持式导板、黏膜支持式导板、骨支持式导板和混合支持式导板; 按照导板引导方式可分为半程导板和全程导板。有学者利用各种类型的计算机辅助设计以及种植导板制作的精确性试验验证了牙支持式导板具有最高的精确性[2]。黏膜支持式导板一般适用于无牙颌病例, 由于其导板直接贴于牙槽嵴的黏膜上, 稳定性较差, 在术中容易滑动而影响定位和精确度, 故有时需要在导板唇颊侧增加固位钉固定; 骨支持式导板多用于无牙颌及缺牙较多的患者, 术中需要翻开黏骨膜瓣, 手术创伤较大, 但其有骨组织的支撑和固定, 植入结果也较精准; 混合支持式导板多用于缺牙较多的患者, 利用余留牙和黏膜组织共同支撑, 植入的效果相对精准, 为医生和患者提供了多样的选择。数字化种植导板辅助牙种植是指在种植牙诊断和设计阶段, 通过锥形束电子计算机断层扫描(Cone beam computer tomography, CBCT)和口内扫描, 获取患者的口腔软硬组织信息, 输出并采集 DICOM (Digital imaging and communications in medicine)数据格式, 利用计算机辅助设计技术进行颌骨模型的三维重建并设计种植方案。经过术前的计算机规划后, 在严格的消毒下将导板放入口内, 辅助定点定位、制备种植窝洞、植入种植体, 最后拧紧 CAD/CAM 制作的个性化愈合基台, 封闭黏膜缺损区, 全过程实现数字化测量、模拟, 制作, 辅助。CBCT 的应用为种植条件的精确评估提供了客观依据, 弥补了 X 线和曲面断层的二维图像解剖结构显示效率低的不足[3]; 术前虚拟的手术程序能够避开下颌管和颞孔等重要解剖结构且科学的结合现有骨量设计最佳种植方案; 设计和运用 3D 打印技术制作的辅助定位板, 可以精确控制种植体的植入位置、角度及深度。有研究表明, 不同的 3D 打印方向会影响数字化导板的精度, 其中最大尺寸平行于打印平台的导板具有更高的准确性[4]。

下颌第二磨牙游离缺失是临床上常见的一类牙列缺损, 种植体修复是其首选的修复方式, 但其位置靠内且有邻牙存在, 种植时视野受限且易损伤邻牙, 有研究表明数字化导板辅助可以提高医生的操作稳定性, 防止窝洞预备及植入时钻针向骨密度较低的方向偏移, 有效规避邻牙损伤和颊舌侧骨壁穿通等情况, 提高植入精准度[5]。在下颌后牙区连续多牙种植修复中, 数字化种植导板的应用可以减少翻开的黏

膜组织,数字化扫描制作的修复体更符合天然牙解剖外形,有利于提高种植成功率改善软组织的愈合情况及种植体牙周健康状况[6]。对于下颌无牙颌的种植,All-on four 技术采用前牙区垂直植入、远中颊孔前 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 远中倾斜植入,将植入后与预期种植三维位点进行比对,前牙区轴向植入植体在颈部、根尖和角度上误差均小于自由手操作,后牙区倾斜植入的植体,在颈部、根尖、深度和角度上误差均小于自由手操作,且能够在术后通过口内扫描转移咬合关系完成即刻修复即刻负重,简化手术,较快地恢复无牙颌患者美观及功能的需求[7]。同样的在下颌前牙种植修复中,数字化种植导板和面部扫描结合,在避开重要的神经血管、结合最佳生物力学的同时,面部扫描通过3D光学扫描设备获取面部软组织三维图像信息,使修复体的每个细节变化与患者软组织的解剖特征相联系,满足颌面部的个性化修复[8]。综上所述,数字化种植导板在下颌种植中的应用极大的提高了手术效率与安全性,在下颌不同类型的牙齿缺失种植中都具有应用价值。

2.2. 导航系统

动态导航系统(Dynamic navigation system, DNS)用于口腔种植中是在导航仪引导下实施种植手术,就像我们在“GPS”定位系统指引下驾驶车辆。动态导航系统通常有两部分组成:追踪患者和手术器械位置的红外摄像机和处理三者之间坐标关系的计算机。在手术过程中,导航仪的屏幕上会实时显示手机、钻针、植体与颌骨的三维位置关系,并通过误差控制图,实时显示医生当前手术与术前设计的偏移方向和偏移量,医生可以根据导航仪屏幕的指示,动态调整种植体的位置[9]。有研究表明动态导航下种植体的平均误差为颈部0.59 mm,根部0.85 mm,角度 1.98° [10],特别是在患者骨质条件较差、距离神经管近、可操作空间小的情况下能实现精准定位,精确到微米测量,让手术更直观,真正体现了微创手术的精准性。

对于下颌磨牙区牙槽骨严重萎缩不能行常规种植的患者,需提前进行垂直骨增量增加可利用骨高度,或将种植体倾斜一定的角度,偏颊或偏舌越过下颌神经管,有效利用下颌神经管以下的颌骨区域进行种植,但凭借医生的经验和手感进行倾斜种植的风险较大,利用种植导板存在跨下颌管手术区域不可视和下颌后牙区的张口度要求高等问题[11]。动态导航技术展现出了相对优势,在动态导航系统的指导下,Wang等跨下颌神经管将植体植入在下颌神经管至牙槽嵴顶1.5 mm,牙槽嵴顶颊舌径宽度约9.6 mm,下颌神经管颊侧骨质厚度9.1 mm的右下颌第二磨牙碟形牙槽嵴内,其术后精准度测量显示种植体颈部中心点与根尖部偏差分别为0.5 mm和0.7 mm,种植体与下颌神经管的间距偏差0.6 mm,种植体角度偏差 2° ,种植体达到了术前预定的理想位置且手术精度较高,避免了外置植骨、牵张成骨或下牙槽神经移位术等复杂手术[12]。研究表明,当剩余牙槽骨高度(Residual bone height, RBH)小于6 mm且下颌神经管到颊侧骨壁有足够的骨量时,动态导航系统种植可以有效避免神经游离术后神经感觉障碍和自发性下颌骨折[13]。但导航系统也属于人为操作,其精准度会受医生操作能力的影响,也受颌骨密度和骨质条件影响,在上颌前部的种植精度高于下颌前部,下颌后部的种植精度高于上颌后部,同颌前部种植精度高于后部[14]。因此为了提高精准度,对于牙槽嵴吸收缩窄的病例,需要在预备种植窝洞之前对术区的牙槽骨进行适当的外形修整,防止手术过程中发生钻针滑脱偏离设计位置,同时也可以将动态导航系统与静态数字化种植导板结合应用。马等[15]研究发现使用导板在水平方向上的偏差较小,动态导航可以把角度控制得更好,两种方法联合使用时,可以将这两种优势结合到一起,相比单独使用自由手、数字化导板、动态导航系统的精度都有提高,对植入位点、深度和角度都提供了更准确的指引,与Sun等的研究结果一致[16]。

2.3. 机器人

近年来,机器人已经成功应用于口腔修复、正畸、牙体牙髓及外科手术等方面,由于其高精度和高

稳定性,在口腔种植中也逐渐推广[17]。口腔种植手术机器人由计算机、机械臂、种植机及导航系统组成,其中计算机负责术前规划和术中实时观察手术进程;机械臂和种植机帮助医生操作种植过程;导航系统采集种植区域和种植手机的实时位置,计算机在术中自动追踪种植区域,并按手术方案精准的调整种植手机在术区的位置,从而完成植体的植入[18]。2017年白石柱等提出了由机器人操作平台、双目视觉系统和主控系统三部分构成的口腔种植机器人系统,开发出 DentalNavi 牙科种植设计导航控制软件,最终实际制备完成的种植窝洞与设计相比,其肩部与根部偏差小于 0.5 mm,角度偏差小于 2° [19]。2023年 Yang 在机器人进行单牙缺失患者种植手术的结果表示,种植机器人在临床应用种植体颈部误差和根部误差最小值为 0.53 mm、角度误差最小值为 0.78° [20],机器人开创的数字种植牙新时代正在被良好的应用。机器人的优势也体现在节省手术时间上,目前的牙科机器人在切换机械臂时需要更多的时间,例如将机械臂从位置控制模式切换到力控制模式需要多个步骤,Kan 等制作的人机协作种植系统(HRCDIS)采用零力控制,高度灵活的机械臂以减少手动引导机械臂所需的 75%的力,根据指令排列来协调不同的功能,使临床医生轻松完成任务切换,并为机器人植入物的放置提供了更准确的位置和角度[21]。相比于静态导板的张口度要求高、治疗方案无法调整、无实时反馈和动态导航的钻头系统缺乏触觉约束,机器人结合了物理约束和可视化的优点,同时与自由手种植相比,机器人辅助种植的植体位置精度更高,并有助于预防种植体周围疾病[22]。综上所述,机器人在种植中的应用可以弥补自由手种植医生的注意力不集中遗漏的小细节,导航系统手动的不稳定性和感知错误还有导板钻针器械进入深度组织的误差,有着较好的临床应用价值。

3. 数字化技术的优势与欠缺

在传统下颌种植手术中增加骨量、下牙槽神经游离等方法,既降低了手术效率也增加了患者的不良体验,对于下颌多颗后牙的种植,除了要精准避让还要结合合理的受力情况设计共同就位道[23]。数字化种植导板的出现,为下颌种植手术带来了革命性的变化。一方面它可以安全规避种植区重要解剖结构,另一方面可以科学规划种植体沿生物力学方向传导。而且相关研究表明,导板的支持方式、种植体植入方向及种植术区骨密度等因素与数字化种植手术导板引导下无牙颌种植精确度无明显联系[24]。这意味着数字化种植导板的应用具有较高的稳定性和可靠性,不受这些因素的过多干扰。无论导板采用何种支持方式,种植体以何种方向植入,以及种植术区的骨密度如何,数字化种植导板都能够保证较高的种植精确度。Sun 等的研究进一步证实了数字化种植的优势,他们研究表明:种植体导航系统帮助医生准确地将种植牙植入正确位置,其操作精度不受医生的经验水平的限制[25]。机器人从单颗种植到无牙颌种植,证明了它的可靠性,在术中能够突破视野的限制和手动的不稳定性,同时又能够保证高精度[26]。因此数字化种植不光能帮助新手临床医生顺利完成临床工作,也为有丰富的经验和熟练手术技能的医生在处理错综复杂的情况时提供帮助,从而减小最终的手术偏差[27]。其相对于自由手种植出色的植入精准度也是受到临床广泛应用的重要原因。

但手术都属于不可逆性治疗,出于安全考虑,数字化的精确程度尤为重要,Chen 等的调查表示:在数字化种植中,CBCT、口内扫描(IOS)等设备的准确率为 82.8%,数据收集和登记为 71.8%,种植体系统和导向设计软件为 63.0%,分别占较大比重影响手术的精准,说明软硬件和数据处理技术的发展依旧是影响种植准确性的重要因素,需要不断去完善[28]。同时数字化种植精确度还会受多种因素影响,在数据采集过程中口内取模无法精确反应患者口内情况会导致印模信息传递不准确,CBCT 扫描及软件三维重建时曝光度的选择不当可能会对口腔结构的反映不全面,以致评估周围骨量出现偏差;医生术前没有做好判断,过于迁就种植区骨条件,忽略了以修复为导向的理念也会使导板制作过程产生的偏差;导板在使用过程中,其支持方式会导致固定定位偏差,特别是黏膜支持式导板,在一项关于无牙颌患者黏膜引导

准确性的研究中得出, 下颌骨的精准误差大于上颌骨, 后部的误差大于上颌骨和下颌骨的前牙[29]。

由于导板自身占据口内空间, 患者张口度可能会造成手术视野不清、器械操作不便, 现阶段导板制作市场参差不齐, 由于导板制作技术的限制, 可能也会造成导板自身的精确度不足, 与设计存在偏差, 从而导致种植体植入位点有偏差, 影响后续修复体的戴入[7]。此外, 导板还会阻挡冷却水流入手术区域, 使冷却降温效果变差, 因此在术中需特别注意降温, 通过降低种植机转速来预防骨灼伤, 同时在靠近神经管等重要结构时, 可更换略钝的钻头防止损伤。在使用动态导航过程中, 常见的限制和错误是跟踪系统的目标配准误差[30]。严重萎缩的无牙颌或终末牙列阶段存在颌骨严重萎缩的患者, 医生难以获得稳定的骨性解剖标志和天然基牙作为配准标记点, 采用解剖标志或者咬合垫的配准方法无法提供足够的精度来实现导航手术, 激光扫描配准不适用于凹凸不平或活动度大的软组织, 所以主要通过术区周围植入微型钛钉来进行配准[31]。医生在操作时还需要观察电脑屏幕进行操作, 导航系统也无法控制操作。同样其较高的技术敏感性以及昂贵的系统, 也是其在口腔种植领域发展所需要优化的方向。目前大多数字化仪器的主要精通者还是工程师, 临床医生需要加强培训且参与到软件设计中, 才能更熟练地运用数字化设备进行操作。而且随着数字化医疗的快速发展, 一系列个人敏感数据的安全性挑战也在不断增加, 需要采取适当的技术和措施来保护个人隐私和数据安全。

4. 总结与展望

数字化种牙正成为一种流行的选择, 通过合理的规划能够提前预知可能的风险, 增加植入的精确度, 减少手术时间, 给患者有更舒适的种植体验。但也存在一定的局限性, 比如费用较昂贵, 医生需要专门的培训, 同时其自身也存在技术局限比如信息采集不全等。但总体来说数字化种植导板、导航系统、机器人都因各自独特的优势而成为临床种植的一种可靠选择。在下颌种植手术中数字化技术辅助能够更精准的避免手术不良事件, 提高精准度, 是一种有效且便利的新技术。在数字化不断更新的同时, 我们也要与时俱进, 发挥数字化技术正向、良性的作用。

基金项目

内蒙古自治区科技厅“十四五”重点研发和成果转化计划项目(2023YFSH0054)。

参考文献

- [1] 黄平, 商红国. 数字化种植导板在下颌后牙区连续多牙缺失下的临床应用[J]. 山东大学学报(医学版), 2020, 58(2): 60-63
- [2] Geng, W., Liu, C., Su, Y., *et al.* (2015) Accuracy of Different Types of Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing Surgical Guides for Dental Implant Placement. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, **8**, 8442-8449.
- [3] 赵一. 数字化曲面断层与锥形束 CT 在下颌区精确化牙种植的应用对比研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [4] Tahir, N. and Abduo, J. (2022) An *in Vitro* Evaluation of the Effect of 3D Printing Orientation on the Accuracy of Implant Surgical Templates Fabricated by Desktop Printer. *Journal of Prosthodontics*, **31**, 791-798. <https://doi.org/10.1111/jopr.13485>
- [5] 张洪杰. 数字化种植牙导板在修复下颌第二磨牙游离缺失的临床应用[J]. 基层医学论坛, 2021, 25(7): 896-898.
- [6] 庞静, 高小波, 刘静. 3D 打印数字化导板技术在下颌后牙区连续多牙种植中的修复效果及三维精度分析[J]. 中国现代医学杂志, 2023, 33(4): 22-26.
- [7] 高岩, 徐淑兰, 张祥成. 数字化 3D 导板用于下颌 All-on-Four 种植修复的三维精度分析[J]. 实用医学杂志, 2019, 35(17): 2737-2741.
- [8] Otawa, N., Aoki, T., Sumida, T., Yanagi, T. and Kido, H. (2021) Application of a New Scan Body for Face-Driven Fixed Prosthetics. *Clinical and Experimental Dental Research*, **8**, 275-281. <https://doi.org/10.1002/cre2.483>

- [9] 何静怡. 迪凯尔: 在口腔种植手术中开启“导航”[J]. 科技与金融, 2022(3): 26-29+25.
- [10] Stefanelli, L., DeGroot, B., Lipton, D. and Mandelaris, G. (2019) Accuracy of a Dynamic Dental Implant Navigation System in a Private Practice. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **34**, 205-213. <https://doi.org/10.11607/jomi.6966>
- [11] 邓丽, 黄震, 章福保, 等. 下颌神经管颌骨内走行方向的锥形束 CT 测量分析[J]. 中国医学影像学杂志, 2014, 22(3): 161-163.
- [12] Moon, S., Lee, K., Kim, S. and Son, M. (2016) Clinical Problems of Computer-Guided Implant Surgery. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, **38**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1186/s40902-016-0063-3>
- [13] 王苏月, 刘年, 刘莹, 等. 动态实时导航在下颌后牙区跨下颌神经管种植中的临床应用研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2021, 37(12): 730-733.
- [14] 段琳娜. 颌骨部位对动态导航引导口腔种植精度的影响[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 皖南医学院, 2022.
- [15] 马玉霄, 周立波, 孟凡文, 等. 使用四种植入方法在下颌后牙区植入精度的体外对比分析[J]. 中国口腔种植学杂志, 2022, 27(4): 229-237.
- [16] Sun, T., Lee, H. and Lan, T. (2020) Comparing Accuracy of Implant Installation with a Navigation System (NS), a Laboratory Guide (LG), NS with LG, and Freehand Drilling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 2107. <https://doi.org/10.3390/ijerph17062107>
- [17] Jain, S., Sayed, M.E., Ibraheem, W.I., Ageeli, A.A., Gandhi, S., Jokhadar, H.F., *et al.* (2023) Accuracy Comparison between Robot-Assisted Dental Implant Placement and Static/Dynamic Computer-Assisted Implant Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis of *in Vitro* Studies. *Medicina*, **60**, Article 11. <https://doi.org/10.3390/medicina60010011>
- [18] Wang, J., Wang, B., Liu, Y.Y., Luo, Y.L., Wu, Y.Y., Xiang, L., *et al.* (2024) Recent Advances in Digital Technology in Implant Dentistry. *Journal of Dental Research*, **103**, 787-799. <https://doi.org/10.1177/00220345241253794>
- [19] 白石柱, 赵铁民. 口腔种植机器人的相关研究[C]//中华口腔医学会口腔医学计算机专业委员会. 第十五次全国口腔医学计算机应用学术研讨会会议手册. 2017: 2.
- [20] Yang, S., Chen, J., Li, A., Deng, K., Li, P. and Xu, S. (2023) Accuracy of Autonomous Robotic Surgery for Single-Tooth Implant Placement: A Case Series. *Journal of Dentistry*, **132**, Article 104451. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104451>
- [21] Kan, T., Cheng, K., Liu, Y., Wang, R., Zhu, W., Zhu, F., *et al.* (2021) Evaluation of a Custom-Designed Human-Robot Collaboration Control System for Dental Implant Robot. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **18**, e2346. <https://doi.org/10.1002/rcs.2346>
- [22] Chen, W., Al-Taezi, K.A., Chu, C.H., Shen, Y., Wu, J., Cai, K., *et al.* (2023) Accuracy of Dental Implant Placement with a Robotic System in Partially Edentulous Patients: A Prospective, Single-Arm Clinical Trial. *Clinical Oral Implants Research*, **34**, 707-718. <https://doi.org/10.1111/clr.14083>
- [23] 汪烈, 陈智渊, 刘融, 曾豪. 个体化 3D 打印种植导板在多牙种植中的临床应用[J]. 上海口腔医学, 2017, 26(4): 453-457.
- [24] 赖海燕. 半程导航数字化种植手术导板引导下无牙颌种植精确度研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [25] Sun, T., Lee, H. and Lan, T. (2019) The Influence of Dental Experience on a Dental Implant Navigation System. *BMC Oral Health*, **19**, Article No. 222. <https://doi.org/10.1186/s12903-019-0914-2>
- [26] 满毅, 杨幕童. 种植机器人、动态导航及全程导板在口腔种植领域的临床应用进展[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 146-151.
- [27] Tatakis, D.N., Chien, H. and Parashis, A.O. (2019) Guided Implant Surgery Risks and Their Prevention. *Periodontology* **2000**, **81**, 194-208. <https://doi.org/10.1111/prd.12292>
- [28] Chen, Y. and Su, B. (2023) Investigation on the Application of Digital Guide Templates Guided Dental Implantation in China. *BMC Oral Health*, **23**, Article No. 36. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02750-4>
- [29] Vinci, R., Manacorda, M., Abundo, R., Lucchina, A.G., Scarano, A., Crocetta, C., *et al.* (2020) Accuracy of Edentulous Computer-Aided Implant Surgery as Compared to Virtual Planning: A Retrospective Multicenter Study. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article 774. <https://doi.org/10.3390/jcm9030774>
- [30] 赵金荣, 苏天月, 刘鹏慧, 等. 动态导航系统与静态导板系统在口腔种植手术中精确性的模型对比研究[J]. 实用口腔医学杂志, 2023, 39(5): 630-635.
- [31] 蓝耕良, 陶宝鑫, 黄伟, 等. 动态导航引导颧种植体植入的临床工作流程[J]. 中国口腔种植学杂志, 2022, 27(1): 9-15.