

口腔种植机器人的研究进展

李梓涵, 黄元丁*

重庆医科大学附属口腔医院种植科, 重庆

收稿日期: 2026年2月3日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

在数字化技术快速发展的背景下, 机器人逐渐进入口腔医学领域, 催生了一系列新的应用场景和技术突破, 特别是在口腔种植领域, 机器人凭借其高精度与稳定性, 已成为提高种植精准度、提升手术效率、降低操作风险的重要工具。本文就口腔种植机器人的组成、发展历程以及所展现出的优势和存在的局限性进行综述, 为口腔种植机器人的临床应用提供参考。

关键词

口腔种植学, 口腔种植机器人, 牙种植

Research Progress on Oral Implant Robots

Zihan Li, Yuanding Huang*

Department of Implantology, Affiliated Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: February 3, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

With the rapid development of digital technology, robots are now entering the field of oral medicine. This trend has created novel application scenarios and driven technological advancements. In oral implantology, robots have become a crucial tool due to their high precision and stability. They enhance implant accuracy, improve surgical efficiency, and reduce operational risks. This article summarizes the components, evolution, benefits, and limitations of oral implant robots, intending to offer guidance for their clinical use.

Keywords

Oral Implantology, Oral Implant Robot, Dental Implant

*通讯作者。

Copyright © 2026 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

种植已经逐渐成为牙列缺损和牙列损失的首选修复方式。“以修复为导向”是种植外科的首要设计原则,而植入精准度不仅关系到重要解剖结构的安全,还对种植义齿的制作、美观效果、远期成功率有关,因此能否准确放置种植体是影响种植质量和后续修复的一个重要因素[1]。目前常用的数字化辅助技术主要包括静态导板、动态导航以及种植机器人三种方式。随着对精度要求的不断提高,如今种植方案逐渐从使用静态导板偏向于使用动态导航和种植机器人。而与动态导航相比,机器人又进一步减少了对医师手眼协调的依赖,只需要医师操控机械臂移动到设定位置,机械臂就可以按照规划完成窝洞备洞和种植体植入,从而避免因医生手部的颤动和错误的感知而产生的误差[2]。机器人精准、稳定、高效、微创且无疲劳等特性,为现有种植技术中存在的若干问题提供了可行的解决方案[3]。因此,本文就口腔机器人的定义、组成、发展过程加以阐述,讨论现存的优点与不足,并展望未来的发展方向。

2. 种植机器人的定义及组成

根据《共识》,口腔种植机器人被定义为一种借助钻针精确定位与计算机运动控制实现种植体精准植入的外科机器人系统。其基本结构通常由三个部分组成,即机械臂、跟踪定位仪和手术导航的软件,也被称为“手、眼、脑”[4]。在手术过程中,机械臂作为执行部件,可以实现复杂的空间运动,精准执行医生发出的指令,确保种植体能够精确而安全地植入到患者的牙槽骨中。而跟踪定位仪则通过术中实时追踪颌骨的空间位置变化,为手术提供精准的动态空间参考。该过程通常需要借助口戴 Marker、圆形标记盘、以及蛇形探针等标定工具完成空间配准,从而统一坐标系。导航软件作为系统的“大脑”,不仅可以规划机械臂的运动轨迹,还能实时监控机械臂在三维空间内的移动。

3. 种植机器人的发展过程

随着数字化技术和医疗设备的发展,机器人逐渐应用至口腔医学各个分支。早期机器人主要用于口腔颌面外科,近年来其应用范围已经扩展至口腔种植、牙体牙髓等多分支中。

2017年,美国首个口腔种植机器人系统 Yomi 获得 FDA 的批准可用于临床种植手术,该系统集成了手术规划与导航功能,并能提供触觉反馈,可实现对植入位置、深度与角度的实时控制[1]。同年我国北京航空航天大学与空军军医大学赵敏民团队合作,成功联合开发出了世界上第一台自主式种植机器人 Yakebot。该系统具有红外视觉系统,可完成机械臂的全流程自主操作,并于 2021 年进入临床阶段。2019 年 Cao [5] 等人设计并开发了一种用于颧骨种植体放置的新型手术机器人系统,初步验证了机器人在该复杂术式中的潜力。2021 年,我国首次颁发了种植机器人许可证即瑞医博口腔手术机器人,其采用的是非接触式光学导航,即通过可见光导航实现术中实时光学跟踪、随动和自动种植[6]。但是谢瑞[7]等人研究指出可见光系统容易受到环境影响,其导致手术精度偏差会大于红外光导航系统。

4. 优点

1) 机器人具有高水平的精度和稳定性:白石柱[8]等人在动物实验中对自主式机器人与静态全程导板的种植精度,研究结果表明 ADIR 机器人组种植体颈部偏差、根部偏差、角度偏差均显著小于导板组,

且初期稳定性与导板组无显著差异。同时, Tao 等人[9]研究表明和动态导航相比, HRS-DIS 机器人在无牙颌和部分无牙颌的情况下, 种植的精度更高。这与 Madiha Khan 等[10]的研究结果一致即与动态导航相比, 机器人辅助种植时在种植体冠状、顶端和角度偏差更小, 准确性更高。谢瑞等人[11]对自主式口腔种植机器人修复效果进行回顾性研究, 研究成果表明自主式口腔种植机器人植入种植体的肩部偏差是 (0.34 ± 0.11) mm、根部偏差是 (0.34 ± 0.15) mm 以及角度偏差是 $(0.82^\circ \pm 0.38^\circ)$ 。有学者[12]对机器人种植精度进行了 Meta 分析, 结果显示种植体平均颈部偏差、平均根尖偏差、平均角度偏差分别为 0.72 mm、0.90 mm、 1.57° , 进一步证实了机器人种植精度高于其他辅助种植技术。

1) 连续操作而不会疲劳, 减少医务人员的工作量: 自由手、静态导板、动态导航这三种方式, 均依赖医生持续操作, 而长时间的操作可能会因手部疲劳而颤动, 造成误差。机器人系统是通过机械臂进行定点、窝洞备洞、种植体植入等操作, 可减少由医生经验、疲劳和手抖引起的错误, 保持钻针的稳定和正确的植入轴向。机械臂的稳定性与可重复性不仅保障了手术精度, 也减轻了医生长时间手术导致的体力负担, 有利于医务人员的职业健康[13]。

2) 对医师手术经验或者技能的要求较低, 减少培养种植医生时间和成本: 以自主种植牙机器人系统 Yakebot 为例, 医生仅通过脚踏板, 即可控制机械臂自主定位、备洞、植入[14], 实现了高度自动化程度下的高精度种植。且机器人系统可在术前设计方案时就“以修复为导向”、参考重要解剖结构的位置、周围骨质密度形态、理想修复效果等因素进行种植位点的选择和种植计划的制订。再结合术中实时可视化监控, 使得植入过程更加精准可控, 大幅降低人为因素引起的偏差, 缩短了培养医生的周期与成本。

3) 无导板遮挡, 冷却效果和视野较好: 传统静态导板会阻挡冷水进入术区, 降温效果较差[15], 且由于手术区域被导板遮挡, 导致医生无法直接观察到术区情况, 无法感知钻针进入的确切深度和位置。而机器人系统在此方面进行了改进, 术中屏幕可以实时反映手术过程如钻针位置、进入深度、植入扭矩等, 便于医生监控和评估, 确保每一个细节都能得到妥善处理, 不仅提高了手术的精确度, 也为医生提供了一个更加安全和高效的工作环境。

5. 临床应用流程

机器人辅助种植手术已形成一套严谨的数字化流程, 其核心在于将虚拟手术计划精准转化为实际操作。不同机器人系统的交互模式和流程虽有不同, 但其主要步骤可概括如下:

1) 术前数据的采集: 获取患者术前锥形束计算机断层扫描数据 (CBCT) 以及数字化口腔扫描数据, 获得上下颌牙列信息和咬合情况。

2) 术前规划设计: 将术前 CBCT 数据与口腔扫描数据导入在机器人设计软件中进行配准, “以修复为导向”的原则结合患者牙槽骨情况、美学要求等, 选择合适的种植体系统与型号, 规划理想的种植体植入位置。在设计软件中规划种植手术钻针使用顺序、钻速以及手机的方向等参数, 并设计打印定位导板。

3) 术中注册: 患者佩戴口戴 Marker, 调整机器人的红外视觉系统, 使其能同时识别到口戴 marker 和机械臂。启动机器人操作软件程序, 按照提示, 依次完成机器人校准、口内注册点配准等配准标定工作, 完成坐标系的统一。

4) 术中手术: 配准完成后, 医生将机械臂移动至术区, 通过脚踏板完成精调, 引导机械臂执行末端到达预定种植体位置。随后, 机械臂严格按照术前规划路径, 自主进行逐级备洞。术中导航界面实时显示钻针的移动轨迹、植入深度以及规划路径的偏差。

5) 术后精度验证: 将术后 CBCT 影像导入至机器人设计软件中与术前计划进行对比, 可评估实际植入位置与设计位置在肩部、根尖及角度上的偏差, 完成术后精准度验证。

6. 机器人在不同缺失类型中的应用

1) 单颗牙缺失: 由于邻牙可作为稳定的空间参考, 机器人在此类病例的配准通常较为简单, 多采用牙支持式定位导板或者定位标记器直接固定等方式, 使得视觉系统能够精准动态跟踪颌骨。机器人的核心价值在于它能严格遵循“以修复为导向”的术前规划, 将种植体按照预设的三维位置与轴向精准植入。研究显示, 机器人辅助单颗牙种植的冠向偏差、根尖偏差及角度偏差平均值分别为 0.74 mm、0.73 mm 和 1.11° [16]。在美学要求高的前牙区, 种植体的三维位置是影响最终修复效果的关键因素之一, 因此高精度的植入尤其重要。多项研究证实机器人辅助前牙区即刻种植能够取得较高精度[17]-[19], 且其精度优于动态导航[20]。

2) 多颗牙缺失: 此类病例的难度在于不仅要保证每个种植体自身的植入精度, 还要保证多颗种植体之间具有良好的平行度和共同就位, 以便完成后续桥体修复。配准方式需要根据缺失的类型而定: 若缺牙区邻牙数量充足且稳定, 仍可借助定位板或定位器完成配准; 若缺牙跨度较大或余留牙较少, 则可能需要辅助支抗钉来保证配准精度。

3) 无牙颌: 传统无牙颌种植手术多凭借医生的经验, 通过对解剖结构的判断, 由自由手完成种植体植入, 此方法不仅对医生技术要求高, 且易出现植入偏差, 难以精准实现“以修复为导向”的理念。随着数字化技术的发展, 静态导板、动态导航及机器人辅助手术已成为主流解决方案。有研究证明, 在自由手、静态导板、动态导航及机器人辅助这四种方式中, 机器人的精度最高, 且显著优于其他三种方法[21]。且由于机器人是由机械臂执行指令, 不仅降低了对医生个人操作经验的要求, 而且还能实现精准、微创的植入, 有助于减少术中并发症。但是由于无牙颌患者缺少可配准的稳定解剖结构, 需要术前植入支抗钉辅助完成配准, 这在一定程度上增加了患者的创伤。

机器人辅助种植的优势随牙列缺失复杂程度的增加而愈发显著。临床医生应根据具体病例类型, 选择相应的机器人配准与操作策略, 以最大化患者的治疗收益。

7. 不足

1) 术前准备时间长, 术中操作流程繁琐: Xu 等[22]在体外模型对不同类型的机器人即自动式 AR、半自动式 SR、被动式 PR 机器人的效率进行对比研究, 得出 SR 组、PR 组和 AR 组的平均准备时间分别为 1.65 ± 0.19 分钟、 2.14 ± 0.06 分钟和 3.85 ± 0.17 分钟, 即自动式机器人所需要的准备时间最长, 这可能与自动式机器人需要进行空间标定和录制进出口的路径有关。而吴煜等人[23]报道口腔种植机器人瑞医博的术前准备时间为(从手术注册到机械臂开始窝洞制备的时间) 3~23 min, 平均 8 min。机器人繁琐的术前准备以及术中因患者头部移动而需要重新标定位置可能是手术操作时间长的主要原因。

无法自主完成整个种植过程: 医疗机器人目前分为 6 个等级, 包括无自主性, 机器人辅助, 任务自主性, 条件自主性, 高自主性, 完全自主性[24]。现有的瑞医博口腔种植机器人的自主性介于 Level 2 和 Level 3 之间, 雅客智慧自主性介于 Level 3 和 Level 4 之间, 属于任务自主型即机器人可以自主执行任务, 但是需要医生进行监控和干预。当前机器人仅能完成种植体的备洞植入, 麻醉、翻瓣、缝合等步骤仍需要医师配合完成, 尚未实现全程自动化。

无法处理复杂情况: 拔牙会导致牙槽嵴轮廓塌陷和不可逆的牙槽骨流失, 通常需要辅助手术来确保种植位点充足的骨量, 如简单植骨、引导骨再生 (GBR)、上颌窦提升等骨增量技术[25] [26]。虽然机器人可以达到种植体高精度的定点植入, 但是位点所需的骨增量技术仍然需要医师进行判断、规划和执行, 软组织增量也同理。现阶段机器人没有这些更高层次的处理能力, 也无法对于术中并发症进行处理。目前机器人种植技术仍然需要医师进行配合、监控和管理[27]。

机器人设备昂贵、成本高、对诊室的空间需求大: 种植机器人作为高科技医疗设备, 购置与维护成

本较高。此外, 由于这些机器人在操作过程中对诊室空间有着较高要求, 因此并不是所有医疗中心都能配备。这些因素抬高了其临床推广的门槛, 目前主要集中在大型医院或研究机构中。

患者的接受度较低: 尽管机器人系统日趋成熟, 但是部分患者对于采用此类新兴技术仍持保留态度, 选其作为治疗手段的意愿并不强烈, 对自动化工具的信任与接受度尚需培养。

8. 总结与展望

口腔种植机器人的发展标志着口腔种植向精准化、智能化方向迈进, 然而其在流程优化、成本控制与临床适应症拓展等方面仍面临挑战。目前的研究主要是集中在种植体植入准确度方面, 未来还需要更广泛的临床试验来持续观察和评估长期效果。口腔种植机器人作为一种高精度的新兴技术, 有望在更广泛的临床场景中发挥作用, 推动口腔种植治疗的整体水平迈向新的高度。

参考文献

- [1] Wu, Y., Wang, F., Fan, S. and Chow, J.K. (2019) Robotics in Dental Implantology. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, **31**, 513-518. <https://doi.org/10.1016/j.coms.2019.03.013>
- [2] Dibart, S., Kernitsky-Barnatan, J., Di Battista, M. and Montesani, L. (2023) Robot Assisted Implant Surgery: Hype or Hope? *Journal of Stomatology Oral and Maxillofacial Surgery*, **124**, Article ID: 101612. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2023.101612>
- [3] 田英楠, 李伯休, 张浩, 等. 口腔机器人种植技术的进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(12): 1300-1306.
- [4] 林宇轩, 张思慧, 陈江. 《口腔种植机器人临床应用的专家共识(第一版)》解读[J]. 中国实用口腔科杂志, 2024, 17(1): 33-36.
- [5] Cao, Z., Qin, C., Fan, S., Yu, D., Wu, Y., Qin, J., et al. (2019) Pilot Study of a Surgical Robot System for Zygomatic Implant Placement. *Medical Engineering & Physics*, **75**, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.07.020>
- [6] 陈圆圆, 尼加提·吐尔逊. 口腔种植机器人的研究发展及应用现状[J]. 医学理论与实践, 2023, 36(9): 1481-1483.
- [7] 谢瑞, 李志文, 任楠, 等. 口腔种植机器人在不同视觉系统下的手术精度研究[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 152-158.
- [8] 白石柱, 任楠, 冯志宏, 等. 自主式口腔种植机器人手术系统动物体内种植精度的研究[J]. 中华口腔医学杂志, 2021, 56(2): 170-174.
- [9] Tao, B., Feng, Y., Fan, X., Zhuang, M., Chen, X., Wang, F., et al. (2022) Accuracy of Dental Implant Surgery Using Dynamic Navigation and Robotic Systems: An *in Vitro* Study. *Journal of Dentistry*, **123**, Article ID: 104170. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104170>
- [10] Khan, M., Javed, F., Haji, Z. and Ghafoor, R. (2024) Comparison of the Positional Accuracy of Robotic Guided Dental Implant Placement with Static Guided and Dynamic Navigation Systems: A Systematic Review and Meta-Analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **132**, 746.e1-746.e8. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.02.015>
- [11] 谢瑞, 白石柱, 赵敏民. 自主式口腔种植机器人牙列缺损种植修复的临床回顾性研究[J]. 实用口腔医学杂志, 2024, 40(1): 58-63.
- [12] 李艳琴, 陈江. 机器人系统辅助口腔种植手术精度的 Meta 分析[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 186-192.
- [13] 周梦琪, 张金宁, 洪瑾. 机器人在口腔医学领域的应用[J]. 上海口腔医学, 2016, 25(5): 626-629.
- [14] Liu, C., Liu, Y., Xie, R., Li, Z., Bai, S. and Zhao, Y. (2024) The Evolution of Robotics: Research and Application Progress of Dental Implant Robotic Systems. *International Journal of Oral Science*, **16**, Article No. 28. <https://doi.org/10.1038/s41368-024-00296-x>
- [15] 庞莉苹, 许铭炎, 郭伟忠, 等. 数字化外科导板在口腔种植修复中的应用分析[J]. 中国口腔种植学杂志, 2022, 27(5): 292-298.
- [16] 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 ID: 104451. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104451>
- [17] 黄弘, 付钢, 陈曦, 等. 口腔种植机器人在前牙区即刻种植中的精度分析[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 172-178.
- [18] Li, P., Zhao, C., Chen, J., Xu, S., Yang, S. and Li, A. (2024) Accuracy of Robotic Computer-Assisted Implant Surgery

-
- for Immediate Implant Placement: A Retrospective Case Series Study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **26**, 1279-1288. <https://doi.org/10.1111/cid.13383>
- [19] Zhao, N., Du, L., Lv, C., Liang, J., He, L. and Zhou, Q. (2024) Accuracy Analysis of Robotic-Assisted Immediate Implant Placement: A Retrospective Case Series. *Journal of Dentistry*, **146**, Article ID: 105035. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105035>
- [20] 朱艺丹, 张小凤, 张孝霞, 等. 主动式口腔种植机器人与动态导航系统在前牙区牙列缺损种植修复中的精度比较[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2025, 6(12): 2014-2018.
- [21] Zhao, W., Teng, W., Su, Y. and Zhou, L. (2025) Accuracy of Dental Implant Surgery with Freehand, Static Computer-Aided, Dynamic Computer-Aided, and Robotic Computer-Aided Implant Systems: An *in Vitro* Study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **134**, 2416-2423. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.10.013>
- [22] Xu, Z., Xiao, Y., Zhou, L., Lin, Y., Su, E., Chen, J., *et al.* (2023) Accuracy and Efficiency of Robotic Dental Implant Surgery with Different Human-Robot Interactions: An *in Vitro* Study. *Journal of Dentistry*, **137**, Article ID: 104642. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104642>
- [23] 吴煜, 邹士琦, 王霄. 口腔种植机器人在口腔种植手术中的初步应用[J]. *中国微创外科杂志*, 2021, 21(9): 787-791.
- [24] Yang, G., Cambias, J., Cleary, K., Daimler, E., Drake, J., Dupont, P.E., *et al.* (2017) Medical Robotics—Regulatory, Ethical, and Legal Considerations for Increasing Levels of Autonomy. *Science Robotics*, **2**, eaam8638. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam8638>
- [25] Van der Weijden, F., Dell'Acqua, F. and Slot, D.E. (2009) Alveolar Bone Dimensional Changes of Post-Extraction Sockets in Humans: A Systematic Review. *Journal of Clinical Periodontology*, **36**, 1048-1058. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051x.2009.01482.x>
- [26] Tan, W.L., Wong, T.L.T., Wong, M.C.M. and Lang, N.P. (2011) A Systematic Review of Post-Extraction Alveolar Hard and Soft Tissue Dimensional Changes in Humans. *Clinical Oral Implants Research*, **23**, 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2011.02375.x>
- [27] Bahrami, R., Pourhajibagher, M., Nikparto, N. and Bahador, A. (2024) Robot-Assisted Dental Implant Surgery Procedure: A Literature Review. *Journal of Dental Sciences*, **19**, 1359-1368. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2024.03.011>