

机器人在口腔种植中的研究进展

陈虹西, 黄元丁*

重庆医科大学附属口腔医院种植科, 重庆

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月5日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

医疗机器人的发展是一个漫长的探索之旅。在工业机器人中得到实际验证后, 这项技术已经在全球范围内普及使用, 现在已经成为现代生产和生活方式的重要组成部分。医疗机器人在诊断、治疗、可视化和其他临床实践领域逐渐处于领先地位。现如今口腔种植的迅速发展, 机器人也逐渐运用到种植手术中。本文综述了牙科种植机器人系统的发展历史、临床现状和发展前景。

关键词

机器人, 种植

Research Progress of Robots in Oral Implantology

Hongxi Chen¹, Yuanding Huang*

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

Received: November 11, 2025; accepted: December 5, 2025; published: December 11, 2025

Abstract

The development of medical robots is a long journey of exploration. After practical verification in industrial robots, this technology has been popularized and used all over the world, and now it has become an important part of modern production and lifestyle. Medical robots are gradually taking the lead in the fields of diagnosis, treatment, visualization and other clinical practices. Nowadays, with the rapid development of oral implants, robots are gradually applied to implant surgery. This paper summarizes the development history, clinical status and development prospect of the dental implant robot system.

*通讯作者。huangyd@126.com

Keywords

Robot, Plant

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. 发展历程

根据国际标准化组织(ISO)的定义,机器人是一种具有多个轴的自动,位置控制,可编程的多功能机械手。它可以通过可编程自动化处理各种材料,零件,工具和特殊设备,以执行预期的任务[1]。机器人的结构通常由四部分组成:制动系统,传动系统,控制系统和智能系统。驱动系统是机器人的一部分,直接执行工作,类似于人类的手。驱动传动系统通过动力源将力和运动传递到致动器。控制系统包括控制计算机、控制软件和伺服控制器,类似于人类大脑。智能系统通常包括感知系统和分析决策智能系统。

机器人的演变及机器人的发展历史可以追溯至三千多年前[2]。纵观历史,科学家和工匠曾设计和制造出模仿动物或人类特征的机器人原型[1]。然而,这些发明只能归类为主要通过机械和物理原理实现自动化功能的机械装置,缺乏现代机器人的智能和自主性。这些发明展示了古代的工程技术和机械制造水平,为后来机器人的研究奠定基础。Joseph Engelberger 被公认为机器人之父,他于1958年创立了 Unimation Corporation,这是世界上第一家机器人制造工厂,标志着机器人工业化的正式开始。1978年,Unimation 开发出一种可编程通用装配机器(Programmable Universal Machine for Assembly,简称 CUP A),这是国际工业机器人发展的一个重要里程碑。近年来,由于传感器类型、智能算法和多学科集成的持续发展,机器人技术得到了显著的发展。该技术已从最初的工业机械臂发展到仿生机器人、软体机器人、纳米机器人等多种形式。

口腔中的治疗涉及多个特殊重要解剖结构,治疗过程具有可视性差、手术空间狭窄、唾液和舌的干扰等特点。因此,口腔手术是复杂的,手术效果主要依赖于外科医生丰富的临床经验和专业知识,这需要没有经验的外科医生花很长时间才能获得,时间成本高。随着芬奇机器人系统在腹腔镜手术中的成功应用,外科医生开始考虑其在颌面外科的潜在应用。在美国,第一个机器人牙科手术系统 Yomi (Neocis Inc, 迈阿密,佛罗里达州,美国)于2017年获得FDA批准用于牙科种植手术。这是第一个提供了在植入手术过程中规划和导航指导仪器的软件。该系统还提供触觉反馈,并控制植入物截骨术的位置、深度和角度。2002年 Boesecke 等构建出一种辅助钻孔操作的机器人系统[3],可以按照术前规划制备出相应深度、角度及位置的种植窝洞。2011年, Sun [4]等先用锥形束 CT 重建患者颌骨三维模型,然后在虚拟模型中规划种植体位置,引入坐标测量机(CMM)作为参考坐标系进行注册,是一种图像引导的种植机器人系统。赵铤民教授及其团队[5]在2016年研发出一种高度自动化的口腔种植机器人系统,它包括术前设计、力反馈仪、手术机器人和红外光学导航仪,通过建立空间映射进行定位。

种植机器人的架构主要包括用于手术数据采集和手术执行的硬件。数据采集涉及感知,识别和理解周围环境以及通过编码器,触觉传感器,力传感器和视觉系统执行任务所需的信息。获得的实时信息还包括机器人的周围环境、物体位置、形状、大小、表面特征和其他相关信息。感知系统帮助机器人理解其工作环境,并促进相应的决策以及行动。

2. 技术特点

种植术被广泛认为是部分或完全缺牙患者的首选治疗方法[6][7]。种植体植入的准确性是影响种植体治疗和相关康复结果最重要因素之一。准确的种植体放置对于避免潜在并发症至关重要,如受到过度侧向力、修复体位置未对准、食物嵌塞、继发性骨吸收,种植体植入过程中的任何偏差都可能导致周围血管、神经和邻近牙根的损伤,甚至导致上颌窦穿孔[8]。手术导航系统和模板引导满足种植体放置和定位的高精度要求。外科医生已经尝试使用这种技术来减少种植体定位的错误。然而,外科医生的物理位置通常由于患者的开口和缺失牙齿的位置的限制而受到约束。除此之外,外科医生还可能会受到耐力和疲劳的影响,从而无法消除人为错误或误差。此外,机器人辅助种植体手术可以提供准确的种植体放置位置,并帮助外科医生控制手柄,以避免手术期间危险的钻针等器械偏移[9]。此外,与手动校准、配准和手术执行相比,使用牙科种植体机器人系统的自动校准、配准和钻孔可以大大减少人为错误因素。这反过来又有助于避免由外科医生造成的种植体偏差,从而提高手术的准确性、安全性、成功率和效率,同时也可以减少患者的创伤及痛苦[10]。临床研究和模型研究中的汇总平台和顶点偏差均在1 mm以内,角度偏差为1.5°,优于静态导向器的报告偏差和动态导航。其准确性表明,机器人辅助下的手术有可能成为引导种植体放置的绝佳方案。

3. 临床应用

机器人辅助牙科种植手术由三个步骤组成:术前计划,术中阶段和术后阶段。对于术前计划,有必要从患者获得数字口内模型和CBCT数据,然后将其导入术前计划软件进行3D重建和计划种植体放置[11]-[14]。

Bolding等人使用的触觉牙科植入机器人(1级),与使用半主动(1级)或主动机器人(2级)的其他研究相比[15],种植体的植入会产生更多偏差。由于其手柄必须由外科医生操作,因此可能无法避免出现人为错误,例如外科医生疲劳等。由于进行了术前设计,收集了患者术前口内口扫数据及影像学数据等,可术前选出相应型号的复合基台,有些满足相应条件的全口患者术后可以行即刻修复,大大减轻患者缺牙的痛苦。这些结果表明,机器人系统可以在手术过程中准确定位和执行种植体的植入。Tak ACS等人[16]在体外条件下进行了一项荟萃分析,包括徒手、静态引导、动态导航和机器人辅助种植体放置。结果发现,与徒手、静态引导和动态导航种植体放置相比,机器人辅助种植体放置在准确性方面更具优势。然而,体外研究不能完全模拟患者的口腔状况和牙槽骨质量。最近的临床研究[17]-[19]表明,与静态引导和动态导航种植体放置相比,机器人辅助种植体放置的偏差相对较低。静态引导和动态导航种植体放置偏离的常见原因包括:手术期间因牙槽骨密度不均而引起手震颤导致的钻针偏转、外科医生的临床经验和其他人造因素。未来将需要更大规模的临床研究来评估机器人和传统手术方法之间的差异,并为机器人技术的进一步发展和完善提供指导。

4. 当前不足

虽然机器人辅助牙科种植手术可以提高准确性和治疗质量,但它涉及复杂的配准,校准和验证程序,延长了手术时间。这些繁琐的过程可能会引入新的误差[17],并降低工作效率,特别是在单颗牙齿植入时,这可能会延长就诊时间并影响患者满意度[9]。此外,外科医生需要接受额外的培训以熟悉机器人系统[18]。在植入过程中,机器人臂末端的钻尖不能倾斜,这会增加在咬合空间有限的口腔后部及有张口受限的患者中使用机器人的难度[12][20]。此外,目前可用的标记系统需要患者佩戴额外的器械以将标记固定到位。如果这些标记被血液污染或阻挡,视觉系统可能无法检测到它们,从而在一定程度上限制了手术的可操作性。在种植体即刻植入期间或在种植部位骨质较差的情况下,钻尖可能会偏向牙槽窝或骨密度

较低的区域,严重影响手术精度。尽管机器人系统在医疗领域具有巨大的潜力,但与计算机辅助设计/计算机辅助制造技术的发展类似,引入和应用这一技术在初始阶段面临着多重挑战。机器人设备的高成本可能会限制其在某些地区或医疗机构的推广和应用。外科医生在操作机器人系统之前需要专门的技术培训,这意味着额外的培训成本和时间投资[21]。

为更系统地审视上述挑战,可构建一个“技术-临床-商业”多维度分析框架,来探讨各项不足之间的内在联系与相互影响。技术层面的局限性(如配准流程复杂、视觉标记易受污染或阻挡、机械臂灵活性不足,难以适应后牙区或张口受限患者)是临床操作瓶颈(如手术时间延长、适用病例受限)的根源之一;临床应用的复杂性与高要求(如医生培训成本、患者解剖条件限制)又显著推高了医疗机构的运营成本;而商业上的高门槛(如设备与维护费用高昂)则反过来抑制了技术的快速普及与迭代升级。因此,未来的发展必须着眼于这三个维度的协同优化,通过技术创新简化流程、通过临床培训标准化降低操作门槛、并通过商业模式创新控制成本,从而推动种植机器人技术的良性发展与广泛普及。

5. 前景

医疗机器人具有高精度的传感和定位能力,可以在小范围内进行精确操作。它们还配备有安全机制和稳定性控制,以确保医疗程序的安全并减少对患者的创伤。随着技术发展,硬件和算法不断更新,使其性能不断提高。如今,医疗机器人广泛应用于手术、诊断和康复[7]。它们可以实现精确和微创手术,从而减少患者创伤和疼痛,缩短住院时间,加快康复速度,并减少再次手术和输血的概率[22]。通过利用机器学习和人工智能技术,机器人可以根据大量病例数据提供个性化和智能化的治疗计划和建议,来提高诊断效率及准确性。具有远程操作能力的机器人可以实现跨区域的远程手术或咨询,方便获得医疗服务,减小地域医疗资源的差距[23]。此外,机器人可以连续工作,确保医疗质量和一致性,同时减少外科医生的颈部和背部疼痛[24],以及外科医生的手和手腕麻木。

为实现上述潜力并克服现有局限,未来的研究需聚焦于以下几个关键方向:第一,智能感知与术中自适应技术:重点研究如何利用实时力传感、超声或阻抗传感等数据,动态调整手术路径与参数,以应对术中发现的骨密度变化、关键解剖结构邻近等不确定因素,实现从“静态执行”到“动态适应”的跨越。第二,人机协同的精准控制模式:探索更高效、自然的人机交互范式。未来研究应界定在复杂决策(如应对突发情况、创意性修复设计)中,人类医生的主导作用与机器人的自主执行之间的最佳边界,发展“surgeon-in-the-loop”的增强型智能手术平台。第三,专用机构与全流程自动化:针对口腔后区等受限空间的操作难题,开发具有更高灵活度、更小体积的专用机械臂与手术工具。同时,整合口内扫描、种植规划与机器人执行,实现从设计到执行的端到端自动化闭环,以提升效率,减少配准误差。第四,远程手术与普惠应用模式:基于5G/6G等低延迟通信技术,验证机器人辅助远程种植手术的稳定性与安全性,以解决医疗资源分布不均的问题。同时,通过模块化、简化版设计,探索降低系统成本的技术路径与商业模式,推动技术的普惠化应用。

作为一种开创性的尝试,种植机器人系统为牙科机器人系统的应用提供了重要的探索和范例。随着技术的不断进步,机器人和人工智能将提供更精确的诊断和治疗选择,更智能的医疗决策支持系统,以及更灵活和精确的外科手术。这些革命性的技术将继续推动医学和医疗保健的进步,为未来的临床实践开辟新的可能性。

6. 结论

随着新技术的进步,医疗机器人正在为医学带来一个新时代。创新的医疗机器人可以执行外科手术,帮助康复,进行诊断,实现机器人实验室自动化和其他适合各种功能需求的机器人。在口腔领域,目前最广泛使用的机器人系统是口腔种植机器人系统。种植机器人系统可以提供一种更灵活的方法,用于精

确规划, 以及外科手术的视觉和触觉引导。各种临床试验已经证实了种植机器人辅助手术的高准确性和长期植入的成功。然而, 在进一步简化、机器人外科手术的配准和系统化教育方面仍有很大的改进空间。通过利用机器人深度学习和人工智能技术, 将为未来的临床实践提供更精确的诊断和治疗方案, 智能医疗决策支持系统以及灵活精确的外科手术。

参考文献

- [1] Fukuda, T., Dario, P. and Yang, G. (2017) Humanoid Robotics—History, Current State of the Art, and Challenges. *Science Robotics*, **2**, eaar4043. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar4043>
- [2] Dong, J. (2015) What You Should Know about the History of Robotics. *Industrial Robot*, **1**, 108-114.
- [3] Boesecke, R., Brief, J. and Raczkowsky, J. (2002) Robot Assistant for Dental Implantology. *International Poster Journal of Dentistry and Oral Medicine*, **4**, Article 109.
- [4] Sun, X., McKenzie, F.D., Bawab, S., Li, J., Yoon, Y. and Huang, J. (2011) Automated Dental Implantation Using Image-Guided Robotics: Registration Results. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **6**, 627-634. <https://doi.org/10.1007/s11548-010-0543-3>
- [5] 谢瑞. 口腔种植机器人系统精度的相关研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 第四军医大学, 2016.
- [6] Yu, H., Zhou, A., Liu, J., Tang, Y., Yuan, Q., Man, Y., *et al.* (2021) Management of Systemic Risk Factors Ahead of Dental Implant Therapy: A Beard Well Lathered Is Half Shaved. *Journal of Leukocyte Biology*, **110**, 591-604. <https://doi.org/10.1002/jlb.6mr0621-760rr>
- [7] Cheng, L., Yu, H.Y., Wu, Y., Bao, C.Y., Yang, B.C., Man, Y., Sun, Y., Yan, X.L. and Zhou, X.D. (2019) A Review of Peri-Implant Microbiology. *West China Journal of Stomatology*, **37**, 7-12.
- [8] Wu, Q. (2016) Research on the Creation and Application of the Spatial Mapping Devices of the Dental Implant Robot System. Fourth Military Medical University.
- [9] Alqutaibi, A.Y., Hamadallah, H.H., Abu, Z.B., Aloufi, A.M. and Tarawah, R.A. (2025) Applications of Robots in Implant Dentistry: A Scoping Review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **134**, 1052-1061.
- [10] Dupont, P.E., Nelson, B.J., Goldfarb, M., Hannaford, B., Menciacsi, A., O'Malley, M.K., *et al.* (2021) A Decade Retrospective of Medical Robotics Research from 2010 to 2020. *Science Robotics*, **6**, eabi8017. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abi8017>
- [11] Shi, J., Liu, B., Wu, X., Liu, M., Zhang, Q., Lai, H., *et al.* (2024) Improved Positional Accuracy of Dental Implant Placement Using a Haptic and Machine-Vision-Controlled Collaborative Surgery Robot: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Journal of Clinical Periodontology*, **51**, 24-32. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13893>
- [12] Qiao, S., Wu, X., Shi, J., Tonetti, M.S. and Lai, H. (2023) Accuracy and Safety of a Haptic Operated and Machine Vision Controlled Collaborative Robot for Dental Implant Placement: A Translational Study. *Clinical Oral Implants Research*, **34**, 839-849. <https://doi.org/10.1111/clr.14112>
- [13] 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>
- [14] Rawal, S., Tillery, D.J. and Brewer, P. (2020) Robotic-Assisted Prosthetically Driven Planning and Immediate Placement of a Dental Implant. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, **41**, 26-30.
- [15] Bolding, S.L. and Reebye, U.N. (2022) Accuracy of Haptic Robotic Guidance of Dental Implant Surgery for Completely Edentulous Arches. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **128**, 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.048>
- [16] Takács, A., Hardi, E., Cavalcante, B.G.N., Szabó, B., Kispélyi, B., Joób-Fancsaly, Á., *et al.* (2023) Advancing Accuracy in Guided Implant Placement: A Comprehensive Meta-Analysis: Meta-Analysis Evaluation of the Accuracy of Available Implant Placement Methods. *Journal of Dentistry*, **139**, Article 104748. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104748>
- [17] Wang, W., Xu, H., Mei, D., Zhou, C., Li, X., Han, Z., *et al.* (2024) Accuracy of the Yakebot Dental Implant Robotic System versus Fully Guided Static Computer-Assisted Implant Surgery Template in Edentulous Jaw Implantation: A Preliminary Clinical Study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **26**, 309-316. <https://doi.org/10.1111/cid.13278>
- [18] He, J., Zhang, Q., Wang, X., Fu, M., Zhang, H., Song, L., *et al.* (2025) *In Vitro* and *in Vivo* Accuracy of Autonomous Robotic Vs. Fully Guided Static Computer-Assisted Implant Surgery. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **26**, 385-401. <https://doi.org/10.1111/cid.13302>
- [19] Zhang, S., Cai, Q., Chen, W., Lin, Y., Gao, Y., Wu, D., *et al.* (2024) Accuracy of Implant Placement via Dynamic

- Navigation and Autonomous Robotic Computer-Assisted Implant Surgery Methods: A Retrospective Study. *Clinical Oral Implants Research*, **35**, 220-229. <https://doi.org/10.1111/clr.14216>
- [20] Shi, B. and Huang, H. (2020) Computational Technology for Nasal Cartilage-Related Clinical Research and Application. *International Journal of Oral Science*, **12**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1038/s41368-020-00089-y>
- [21] Ding, Y., Zheng, Y., Chen, R., Cao, R., Chen, J., Wang, L., *et al.* (2023) Accuracy of a Novel Semi-Autonomous Robotic-Assisted Surgery System for Single Implant Placement: A Case Series. *Journal of Dentistry*, **139**, Article 104766. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104766>
- [22] Rokhshad, R., Keyhan, S.O. and Yousefi, P. (2023) Artificial Intelligence Applications and Ethical Challenges in Oral and Maxillo-Facial Cosmetic Surgery: A Narrative Review. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, **45**, Article No. 14. <https://doi.org/10.1186/s40902-023-00382-w>
- [23] Forsmark, A., Gehrman, J., Angenete, E., Bjartell, A., Björholt, I., Carlsson, S., *et al.* (2018) Health Economic Analysis of Open and Robot-Assisted Laparoscopic Surgery for Prostate Cancer within the Prospective Multicentre LAPPRO Trial. *European Urology*, **74**, 816-824. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2018.07.038>
- [24] Gofrit, O.N., Mikahail, A.A., Zorn, K.C., Zagaja, G.P., Steinberg, G.D. and Shalhav, A.L. (2008) Surgeons' Perceptions and Injuries during and after Urologic Laparoscopic Surgery. *Urology*, **71**, 404-407. <https://doi.org/10.1016/j.urology.2007.07.077>