

机器人辅助口腔种植的精度及其影响因素研究进展

米热阿力木·米阿迪力^{1,2}, 李小曼¹, 高益鸣^{1,2}

(1.上海交通大学医学院附属瑞金医院 口腔中心, 上海 200025;

2.上海交通大学口腔医学院, 上海 200025)

[摘要] 随着第四次工业革命的演进,更为复杂的智能系统的研发使得数字化技术的可用性和可靠性大大提高。数字化技术通过虚拟现实及增强现实手段模糊了物理世界与虚拟现实之间的界限。口腔种植领域受益于科技的进步,从数字化静态导板技术逐渐向使用动态实时跟踪导航设备和新型自主机器人技术发展。本文就机器人辅助口腔种植的原理及手术常见偏差进行综述,期待为口腔临床及基础研究提供参考。

[关键词] 机器人辅助治疗;口腔种植;动态导航;精度;偏差

[中图分类号] R782.1

[文献标志码] A

DOI: 10.19438/j.cjoms.2024.06.015

The accuracy of robot-assisted dental implant surgery and factors affecting precision MIREALIMU·Miadili^{1,2}, LI Xiao-man¹, GAO Yi-ming^{1,2}. (1.Stomatological Center, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine. Shanghai 200025; 2.College of Stomatology, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine. Shanghai 200025, China)

[Summary] With the evolution of the fourth industrial revolution, the development of more complex intelligent systems has greatly improved the availability and reliability of digital technology. Digital technology has blurred the boundaries between the physical world and the virtual reality through the means of virtual reality and augmented reality. The field of oral implantation has benefited from technological advancements, gradually evolving from digital static guide technology to the use of new dynamic navigation equipment and real-time tracking technology with novel autonomous robots. This article reviewed the principles of various dental robotics and common surgical deviations, aiming to provide relevant references for oral clinical practice and basic research.

[Key words] Robot-assisted treatment; Oral implantation; Dynamic navigation; Accuracy; Deviation

China J Oral Maxillofac Surg,2024,22(6):611-614.

数字化种植技术使得种植手术从传统的高度依赖经验的形式向直观可视、精确可控、系统科学的方向发展,将术前术后的设计方案以数字化形式呈现在患者面前,便于医师与患者更高效、更直观交流。数字化种植技术不仅提高了种植手术的精确度和成功率,还能节约手术时间,减少手术创伤,降低术后并发症发生率^[1]。然而,随着数字化种植在临床运用日益广泛,其局限性也进一步显露,种植精确度尚未到达临床理想程度,诸多不可控因素始终存在于整个手术过程中,如何更好地规避误差,进一步提高临床应用精确性,仍需进一步研究。

[收稿日期] 2023-12-27; **[修回日期]** 2024-04-18

[作者简介] 米热阿力木·米阿迪力(1996-),男,硕士研究生, E-mail: meralimsue@163.com

[通信作者] 高益鸣, E-mail: drgaoyim@163.com

©2024 年版权归《中国口腔颌面外科杂志》编辑部所有

1 机器人辅助下口腔种植手术

机器人辅助种植手术(robot-computer-assisted implant surgery, R-CAIS)是口腔种植领域的新兴数字化技术^[2-3],结合了动态导航的实时反馈和机械臂精确操纵的优点^[4-5]。Yang 等^[6]的研究表明,根据医疗机器人自主水平分级为 2 个系统:机器人辅助半主动和任务自主。在口腔种植领域中,常见的是利用触觉的半主动机器人辅助系统,由操作臂和坐标测量机臂组成,可在植入备洞过程中提供视觉引导和物理(触觉)反馈^[4]。

2 种植机器人的组成及手术流程

2.1 种植机器人的组成

口腔种植手术导航定位设备由专用系统集成仪

器车、手术导航软件、六关节机械臂、光学跟踪定位仪及配套定位附件组成。

2.2 机器人辅助口腔种植手术流程

机器人辅助口腔种植手术流程如图1所示。术前准备包括器械准备,患者佩戴专用定位附件并采集其初次CBCT资料,术前进行虚拟植入规划,待常规手术消毒及局部麻醉完成后进行手术配准。光学跟踪定位仪利用专用定位附件上的坐标信息变换实现光学跟踪定位,机器人全程辅助口腔种植手术,包括逐级备洞及种植体植入。术后末次CBCT数据采集,生成精度分析报告。

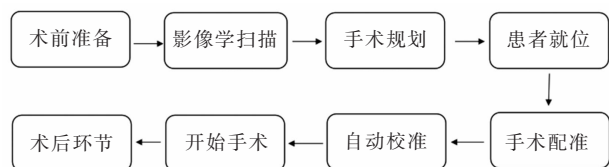


图1 机器人辅助口腔种植手术流程图

Figure 1 Flow chart of robot-assisted dental implant surgery

3 机器人辅助口腔种植手术精度

机器人辅助口腔种植手术相比传统种植具有更高的精度和更优越的性能。机器人辅助口腔种植兼具静态导板和动态导航的优点^[7],传统种植手术主要依赖医师的经验和技术^[8],而机器人辅助种植手术可以通过预先规划好的路径和精确控制,将种植体放入理想位置,从而提高植入的精度和稳定性^[9]。相比之下,导板种植和导航种植虽然也采用了先进技术,但仍然需要医师根据导板或导航设备进行操作,受人为因素的影响较大^[10]。在Tahmaseb等^[11]的荟萃分析中,研究了使用导板植入2238颗种植体的精度偏差,冠部总平均误差1.2 mm(1.04~1.44 mm),根尖点总偏差1.4 mm(1.28~1.58 mm),角度偏差为3.5°(3.0°~3.96°)。同样,Wei等^[12]的荟萃分析评估了使用导航植入1298颗种植体的精度偏差,显示平均冠部总偏差为1.02 mm[95%CI(0.83~1.21)],根尖点偏差为1.33 mm[95%CI(0.98~1.67)],角度偏差为3.59°[95%CI(2.09~5.09)]。导板种植和导航种植虽均提供了较好的精度,但在根尖及角度位置的控制较差。Yang等^[13]对10例患者进行机器人辅助下口腔种植,结果表明,平均植入点偏差为0.74 mm,平均角偏差为1.11°。Linn等^[14]在体外实验中,通过机器人辅助制备76个种植位点,结果表明,平均植入点偏差(0.58±0.36) mm,平均根尖偏差(0.99±0.56) mm,平

均角度偏差(3.78±1.97) mm。Li等^[15]在机器人辅助下给10例无牙颌患者植入59颗种植体,整体偏差、根尖偏差及角度偏差分别为(0.67±0.37) mm、(0.69±0.37) mm和(1.27±0.59)°,这些数据突显了R-CAIS作为口腔种植领域的尖端技术,具有优越的精确性和可靠性。在控制偏差方面,R-CAIS在角度调整上比其他数字化种植技术更为出色。尽管R-CAIS在提高植入精度方面已取得显著成效,但仍存在一定偏差。深入探讨偏差来源,对于进一步优化植入精度和提高临床效果具有重要意义。

4 影响机器人辅助口腔种植精度的相关因素

4.1 术前数据获取

机器人手术依赖术前获取的口腔数据,如CT扫描图像等。如果术前数据获取的准确性不高,可能影响机器人手术的精度。CBCT数据的偏差由体素大小、曝光剂量、成像时间、视野大小、患者在拍摄过程中是否移动和图像伪影等因素决定^[16]。术中配准阶段也可能存在误差,例如,定位标记器的固定方式及位置、CBCT扫描时患者口内的定位附件移位、注册时定位附件移动等,均可导致手术配准产生偏差^[17]。若采用陶瓷球通用定位仪,通过光学系统跟踪患者颌骨,在利用陶瓷球进行配对时,虽然陶瓷球与原存在的修复体及种植体的辨别度在影像学上肉眼可见,但当磁珠接近原种植体或其他金属修复体时,对于机器人识别具体位置的影响程度尚不得而知。

4.2 手术计划和模拟规划

机器人在进行手术计划和模拟时,可能存在一定偏差。这可能是由于医师的手术计划不准确或者机器人在模拟过程中的算法或传感器的精度偏差导致。口腔种植机器人系统是融合多种技术于一体的综合机器人手术系统,种植手术也是基于硬件平台和软件系统的相互配合才能最终完成,每一个组成部分对于种植精度都会产生影响^[18]。

4.3 光学定位

为了使种植机器人执行系统完成手术操作,需要在机器人系统中添加导航系统进行术中导航与定位。光学定位导航系统技术较为成熟^[19],光视觉具有较高的空间分辨率,能够捕获高清晰度的纹理细节,精准度高;但可见光引导下的视觉导航对周围光线环境和设备的稳定性具有较高的敏感性^[20]。此外,震动、风等环境因素也会影响识别^[18]。视觉偏差是视觉

系统在识别标记点时记录的空间坐标与真实值之间的偏差,也是机器人系统主要的偏差来源之一。视觉系统通过不断捕捉专用定位板的位置,从而获取到种植模型的实时位置。如果种植过程中专用定位板和种植模型的相对位置发生变化,种植的精度必然受到影响。

4.4 患者因素

使用机器人辅助口腔种植技术进行手术时,多种特定因素如缺牙状况、牙周健康程度、骨密度和开口度等均可能对植入精度产生显著影响。特别是在未得到良好控制的牙周炎患者中,由于牙可能存在松动,定位标记器的固定可能受阻,直接影响 R-CAIS 的精度。此外,种植位点的选择是影响机器人系统定位和植入过程准确性的关键因素。对于位置难以到达或具有复杂解剖结构的种植位点,机器人可能需要进行复杂的姿态调整,这增加了手术难度和潜在风险。较小的开口度可能导致种植手术机械设备与对颌牙或邻牙接触,从而影响种植精度,并限制了其在第二磨牙区的应用。考虑到第二磨牙区通常需要更大的开口度和特定的机器人姿态才能进行操作,这些因素可能导致手术更加困难和风险增加。患者开口度不仅受到口腔解剖结构和术前状态的影响,还可能受到手术过程中舒适度的影响;而机器人的姿态能力则可能受到其设计和操作程序的限制。种植位点的骨质状况和形态也是影响机器人导航系统稳定性和钻孔准确性的重要因素,这些因素共同对种植体植入精度产生影响。因此,在进行机器人辅助口腔种植手术时,对种植位点的细致评估和慎重选择十分重要。手术过程中,任何患者头部位置的变化都可能导致种植体位置和角度偏离预期,但利用种植机器人的随动功能可以将这类误差降至最低。对于骨质而言,虽然机械臂有一定抵抗骨阻力的能力,但当遇到不平衡的阻力或阻力突然消失时,机械臂难以及时做出调整。这时,钻针就会偏向阻力较小的方向,造成最后结果偏差^[17]。在即刻种植时,种植位点存在密质骨、松质骨等不同密度的组织结构,种植窝洞预备和种植体植入时,可能向骨密度较低的方向偏斜。即刻种植时,种植位点多选择在骨斜面上,钻针(尤其是第一钻)在与骨面接触初时易发生滑动,钻针在骨面的滑动是口腔种植机器人出现种植误差的重要原因^[21]。姜雨汐等^[22]的研究提示,口腔种植机器人即刻种植角度误差较延期种植大,其原

因可能与拔牙窝骨斜面 and 种植位点骨密度差异较大有关。因为牙钻长轴与种植区表面属于非垂直接触,再加上种植区表面的皮质骨硬度较高,这样会给牙钻一个侧向力,而种植手机和牙钻的连接属于非刚性连接,两者之间存在一定的可让性,这种侧向力会使牙钻在钻孔时发生一定偏移^[18]。复习文献得知,目前尚无机器人厂家设计出针对不同骨质情况下的标准化种植机器人手术方案,包括钻孔的选择及其方法和顺序。实际操作中应充分考虑不同植入部位的特点(如骨形态和质量),选择最佳手术方案。

4.5 其他因素

在种植机器人系统模型实验中^[23],机械臂通过末端执行器夹持种植手机完成种植手术。机械臂接受计算机指令,完成既定动作,在这一过程中,机械臂移动、定位偏差是最直接的误差来源,精准性、稳定性以及重复定位的精确性对种植精度产生影响。然而,机器人辅助口腔种植仍然存在一些其他固有误差,包括机器人运动误差、姿态误差以及系统校准误差。为了解决这些误差,研究人员提出了一些改进方案,如增加传感器的数量和精度、优化运动规划算法和改进系统校准方法等^[24]。需定期对机器人系统进行校准,通过标定物体,验证机器人的定位和操作精度,并进行校准调整,确保传感器和执行器的准确性。这些偏差的产生,可能与使用机器人操作频率或机器人出厂时间长久有关。因此,陈江等^[25]建议每 3 个月对机器人系统进行定位精度校验,如出现误差需及时校准。

4.6 术者经验

医师的经验和技术也是确保手术成功的重要因素,适应不同手术模式可能并非易事,新技术的应用存在一个逐步熟练的学习曲线^[26]。在机器人手术过程中,医师可以进行实时观察和干预,以纠正可能出现的误差。正如其他任何技术一样,对于口腔种植机器人的应用,术者始终需要进行适当的临床监督和判断。先进的技术和设备并不会取代临床决策,而是助力提升手术执行效果^[4]。

5 总结与展望

机器人辅助口腔种植技术在提高种植手术的准确性和可预测性方面有着显著优势,但在实际应用中仍然存在一定偏差。通过对机器人辅助口腔种植精度及其影响因素的综合分析,可以更好了解这些

技术的局限性,在实际操作中尽量将各种因素造成的误差最小化,规避风险,进一步提高机器人辅助口腔种植技术的安全性和精确性。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:米热阿力木·米阿迪力负责资料收集、论文撰写;李小曼协助资料收集;高益鸣负责论文审阅。

[参考文献]

- [1] 陈佳怡,贺文鹏,赖仁发,等. 数字化技术在口腔种植学中的研究现状[J]. 微量元素与健康研究, 2021, 38(5): 79-81.
Chen JY, He WP, Lai RF, et al. Current status of research on digital technology in oral implantology [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2021, 38(5): 79-81.
- [2] van Riet TCT, Chin Jen Sem KTH, Ho JTF, et al. Robot technology in dentistry, part one of a systematic review: literature characteristics [J]. Dent Mater, 2021, 37(8): 1217-1226.
- [3] van Riet TCT, Chin Jen Sem KTH, Ho JTF, et al. Robot technology in dentistry, part two of a systematic review: an overview of initiatives [J]. Dent Mater, 2021, 37(8): 1227-1236.
- [4] Bolding SL, Reebye UN. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches [J]. J Prosthet Dent, 2022, 128(4): 639-647.
- [5] Wu Y, Wang F, Fan S, et al. Robotics in dental implantology [J]. Oral Maxillofac Surg Clin North Am, 2019, 31(3): 513-518.
- [6] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics—regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy [J]. Sci Robot, 2017, 2(4): eaam8638.
- [7] 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.
Li YQ, Chen J. Meta-analysis of the accuracy of robot system-assisted oral implant surgery [J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2023, 28(3): 186-192.
- [8] Satloff D. Dental implant success[J]. J Am Dent Assoc, 2002, 133(8): 1040, 1042.
- [9] Mozer PS. Accuracy and deviation analysis of static and robotic guided implant surgery: a case study[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2020, 35(5): e86-e90.
- [10] Block MS, Emery RW. Static or dynamic navigation for implant placement—choosing the method of guidance [J]. J Oral Maxillofac Surg, 2016, 74(2): 269-277.
- [11] Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D, et al. The accuracy of static computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. Clin Oral Implants Res, 2018, 29(Suppl 16): 416-435.
- [12] Wei SM, Zhu Y, Wei JX, et al. Accuracy of dynamic navigation in implant surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. Clin Oral Implants Res, 2021, 32(4): 383-393.
- [13] Yang S, Chen J, Li A, et al. Accuracy of autonomous robotic surgery for single-tooth implant placement: a case series [J]. J Dent, 2023, 132: 104451.
- [14] Linn TY, Salamanca E, Aung LM, et al. Accuracy of implant site preparation in robotic navigated dental implant surgery [J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2023, 25(5): 881-891.
- [15] Li P, Chen J, Li A, et al. Accuracy of autonomous robotic surgery for dental implant placement in fully edentulous patients: a retrospective case series study[J]. Clin Oral Implants Res, 2023, 34(12): 1428-1437.
- [16] Fatemitabar SA, Nikgoo A. Multichannel computed tomography versus cone-beam computed tomography: linear accuracy of *in vitro* measurements of the maxilla for implant placement [J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2010, 25(3): 499-505.
- [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.
Huang H, Fu G, Chen X, et al. Accuracy analysis of dental implant robots in immediate implantation in the anterior tooth area [J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2023, 28(3): 172-178.
- [18] 谢瑞. 口腔种植机器人系统精度的相关研究 [D]. 西安: 第四军医大学, 2016.
Xie R. Research on the accuracy of dental implant robot systems [D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2016.
- [19] Kang SH, Lee JW, Lim SH, et al. Verification of the usability of a navigation method in dental implant surgery: *in vitro* comparison with the stereolithographic surgical guide template method[J]. J Craniomaxillofac Surg, 2014, 42(7): 1530-1535.
- [20] Bi S, Wang M, Zou J, et al. Dental implant navigation system based on trinocular stereo vision [J]. Sensors (Basel), 2022, 22(7): 2571.
- [21] Olivetto M, Bettoni J, Testelin S, et al. Zygomatic implant placement using a robot-assisted flapless protocol: proof of concept [J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2023, 52(6): 710-715.
- [22] 姜雨汐,孙仕晨,万林子,等. 口腔种植机器人在即刻种植中的精度研究 [J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 165-171.
Jiang YX, Sun SC, Wan LZ, et al. Study on the accuracy of dental implant robots in immediate implantation [J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2023, 28(3): 165-171.
- [23] Kan TS, Cheng KJ, Liu YF, et al. Evaluation of a custom-designed human-robot collaboration control system for dental implant robot [J]. Int J Med Robot, 2022, 18(1): e2346.
- [24] 李思佳. 种植牙手术机器人执行系统设计与控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Li SJ. Design and control of the implant surgery robot execution system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [25] 陈江, 宿玉成, 沈国芳, 等. 口腔种植机器人临床应用的专家共识(第一版)[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 134-139.
Chen J, Su YC, Shen GF, et al. Expert consensus on the clinical application of dental implant robots (first edition) [J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2023, 28(3): 134-139.
- [26] Panchal N, Mahmood L, Retana A, et al. Dynamic navigation for dental implant surgery [J]. Oral Maxillofac Surg Clin North Am, 2019, 31(4): 539-547.