

口腔种植机器人的应用现状与研究进展

赵梦雨¹, 张艳萍¹, 周如丽¹, 朱万春^{1,2}

(1. 川北医学院附属医院口腔科 四川 南充 637000; 2. 川北医学院口腔医学院 四川 南充 637000)

摘要 种植修复是目前牙列缺损、缺失的首选治疗手段。由于口腔种植机器人具有高精度、高稳定性等优异性能, 可为口腔种植术提供关键的技术支持, 其开发与应用具有良好的发展前景, 但目前国内口腔种植机器人的研究还相对较少, 本研究对口腔种植机器人的开发历程、主要类型、信息数据采集方式、术中规划与注册、术中操作、优势与缺点以及新近研究进展等进行综述, 以期为口腔种植医师提供参考。

关键词 口腔种植手术; 机器人辅助手术; 人工智能; 种植牙; 数字化; 自动化

中图分类号 R473.78 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 04-0727-07

Application status and research progress of dental implant robot

ZHAO Mengyu¹, ZHANG Yanping¹, ZHOU Ruli¹, ZHU Wanchun^{1,2}

(1. Department of Stomatology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China; 2. School of Stomatology, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China)

Abstract Dental implant restoration is the preferred procedure of replacing defect and missing teeth. Due to the excellent performance such as high precision and reliable stability, dental implant robot can provide key technical support for dental implant surgery, and its development and application have been shown to be promising. However, at present, there are relatively few studies on dental implant robots in China. In this paper, the development history, main types, information data collection methods, intraoperative planning and registration, intraoperative operation, advantages and disadvantages, and recent research progress of dental implant robots are reviewed, with the purpose of providing references for dentists.

Key words Oral Implantation; Robot-assisted Surgery; Artificial Intelligence; Dental Implant; Digitalization; Automation

种植修复是目前牙列缺损、缺失的首选治疗手段^[1], 可为患者提供接近于天然牙功能及形态的修复效果, 而且治疗过程中不损伤邻牙, 种植后稳定性好, 舒适美观^[2]。种植体植入位置的精确性是确保修复效果的关键^[3-4]。但临床中患者的差异性、手术技术的敏感性等均可影响种植体的精准植入。随着人工智能的发展, 目前口腔机器人已广泛应用于修复、正畸、牙体

牙髓治疗等口腔外科领域^[5-8], 也为口腔种植术提供了关键的技术支持。已有研究表明, 人工智能技术辅助下, 种植修复手术更加精准与安全, 可确保种植体置于理想的三维位置^[6-7]。由于机器人具有高精度、高稳定性等优异性能, 口腔种植机器人的开发与应用具有良好的发展前景, 但目前国内口腔种植机器人的研究还相对较少, 本研究对口腔种植机器人的开发历程、

收稿日期: 2024-05-31 录用日期: 2024-06-30

Received Date: 2024-05-31 Accepted Date: 2024-06-30

基金项目: 中华口腔医学会西部口腔医学临床科研基金项目 (CSA-W2020-09); 2020年川北医学院附属医院科研发展计划项目 (2021ZD012); 南充市市校战略合作科技项目 (19SXHZ0077)

Foundation Item: Western Stomatology Clinical Research Fund Project of Chinese Stomatological Association (CSA-W2020-09); Research and Development Plan Project of Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College in 2020 (2021ZD012); City-School Strategic Cooperation Science and Technology Project in Nanchong City (19SXHZ0077)

通讯作者: 朱万春, Email: zhuwanchun323@163.com

Corresponding Author: ZHU Wanchun, Email: zhuwanchun323@163.com

引用格式: 赵梦雨, 张艳萍, 周如丽, 等. 口腔种植机器人的应用现状与研究进展[J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5(4): 727-733.

Citation: ZHAO M Y, ZHANG Y P, ZHAO R L, et al. Application status and research progress of dental implant robot[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(4): 727-733.

临床应用现状及新近研究进展进行综述,以期
为口腔种植医师提供参考。

1 口腔种植机器人的研发历程

计算机辅助下的种植体植入(Computer-aided Implant Surgery, CAIS)是精准定位种植牙植入位点的必要措施^[8]。在临床工作中,其他两种CAIS技术(导板系统与导航系统)仍存在无法完全克服人为误差的缺点。为获得更精准的效果,基于导航系统技术,应用6自由度机械臂的口腔种植机器人应运而生^[9-14]。

2001年Boesecke R等人^[15]最先开发了辅助口腔种植时进行截骨备洞的机器人,其工作区域范围仅为70 cm。2006年Pires J N等人^[16]在综合分析种植体着床方向、位移以及对颌骨的应力大小等因素的情况下,开发了口腔种植机器人,该装置具有机械臂,且包含能够测量应力、力矩等指标的仪器,能够更好地辅助植入修复设计。2008年Wilmes B等人^[17]在德国的RX60机器人技术的基础上,设计了一款正畸支抗钉植入机器人,该机器人具有6自由度,可用于分析植入扭矩与植体直径之间的关联性。2012年另一款具有体积分解计算功能的机器人问世,主要用于在下颌模型中放置根状种植体^[18]。接着,配备立体摄像机的机器人开始被应用于定位种植体植入位置^[19]。2017年美国的Neocis Yomi机器人成为首例获得FDA批准的口腔种植机器人^[20]。该口腔种植机器人系统具有可视化界面、多感官振动反馈等先进功能,但成本高昂,限制了其应用。2017年世界首台“完全自主式”口腔种植机器人由赵铤民教授等人研发,其优势是具有高度自主权,甚至可在无牙科医生干预后执行手术。2021年我国开发的瑞医博口腔手术机器人成为国内首个获得医疗许可证的口腔种植机器人产品,可大幅降低医生学习曲线,实现标准化种植。

2 口腔种植机器人的技术原理

2.1 精准定位与机械臂自动操作

口腔种植机器人通过三维重建、个性化手术导板设计、光学跟踪定位仪、导板配准以及医生的监控和指

令,实现了精准定位,结合机械臂的自动操作,确保种植体能够按照预定的位置和角度准确植入,保证手术的精准度。

2.2 光学追踪定位引导系统与电子化反馈机制

口腔种植机器人采用光学追踪定位引导系统,该系统主要由红外线发光二极管(Light Emitting Diode, LED)、红外线立体摄像机以及动态参考架等关键组件构成,LED被安装在动态参考架上,发出红外线信号,当红外线信号被反射回立体摄像机后,系统会将这些信号转化为口腔结构与组织的位置信息,从而实现精准定位。同时,电子化反馈机制能够实时监测手术过程,及时调整口腔种植机器人的操作,确保手术的顺利进行。

2.3 术前规划与数字化模拟

在手术前,医生通过锥形束X线计算机体层成像(Cone Beam Computed Tomography, CBCT)获取患者口腔内的详细三维数据,使用3D软件进行三维重建,得到患者口腔内的牙齿、牙槽骨、神经管等结构的真实三维模型。利用普兰梅卡Romexis等3D软件,医生可以在电脑上进行虚拟种植计划,并使用软件中的多种评估工具对计划进行评估,根据虚拟种植计划和评估结果,医生可以进一步设计种植导板。口腔种植机器人能够根据这些参数进行自动操作,确保手术结果与术前规划一致。

2.4 动态导航与人机随动

口腔种植机器人在术中能够实时获取患者的影像学数据,并通过动态导航技术确保种植体的植入位置和角度的精准度。同时,人机随动功能使得口腔种植机器人能够根据医生的操作指令进行灵活调整,确保手术的顺利进行。

3 口腔种植机器人的主要类型

根据不同的分类标准,口腔种植机器人可分为不同类型。按照控制方式的差异,可分为被动式与自主式两种^[21]。前者是由医生操控机械臂完成手术,其又可分为主从式(由医生远程操控)与协作式(由医生直接操控,共同协作)。按照口腔种植机器人在手术过程中对患者进行感知方

式的差异,又可分为物理感知与光学感知两类^[22]。其中后者可采用不同的感光元件,因此又分为主动与被动光学感知两种,主动光学感知具有不易受外部环境光线条件影响的优势^[10]。

4 口腔种植机器人的临床应用

4.1 术前信息数据采集 使用口腔种植机器人实施种植手术,必须在术前采集患者颌骨资料。将放射标记点配准装置置于患者口腔中,再行CBCT拍摄^[23]。此外,口腔种植机器人也能够识别口腔中天然牙的解剖标志点,并据此进行配准。目前在术前信息数据采集中,可使用适合患者的个性化定位导板,以提高解剖标志点识别的准确性,防止手动配准过程中出现误差^[24]。口腔种植机器人术前精度校对操作如图1。

4.2 术前规划 口腔种植机器人装配有设计软件,在导入CBCT数据后,可以根据修复为导向的原则,规划理想的种植体植入位置^[25]。此外,还必须为患者设计个性化的口内定位导板^[26]。对于手术中钻针下钻要达到的深度、转速,以及术中机械臂末端应采用哪种入口角度,也必须在术前进行规划,从而顺利指导术中的操作。

4.3 术前注册 口腔种植手术如何应用机器人,应在术前进行机械臂与患者位置的注册。其中光学感知类口腔种植机器人的注册流程中,不仅要对患者颌骨定位装置进行识别,还要对机械臂以及处植手机末端的定位板均进行有效识别,从而提高种植的精准程度^[25]。患者位置的注册方法与术前信息数据集中的配准方法有关,如果在拍摄CBCT时应用了放射标记点配准装置,可采用类似于动态导航系统的方法进行注册^[27]。如果在术前信息数据采集时采用天然牙解剖标志点进行配准,那么患者术前注册的方法是将配准导板置入患者口中,并应用专门的配准探针对各个解剖标志点进行击导^[25]。

4.4 术中操作 术中麻醉生效与翻瓣后,先将机械臂引导进口腔中。拖拽入口式的机械臂必须依靠医生用手将机械臂拖拽到术区^[28];另一种自动入口式的机械臂同样应先依靠医生用手

将机械臂拖拽到术区,并随即拖拽出口,机械臂的入口—出口移动过程会被机器人自动登记,并以此作为手术操作中自动入口的移动路径^[25]。此后,手术医生只需踩脚踏,便可实现机械臂自动入口。在进行钻针预备操作过程中,钻针钻速、受力程度等指标均可由机器人准确显示,从而为操作医生提供类似于亲自进行钻针操作所获得的触觉反馈。口腔种植机器人自主备洞如图2。



图1 种植术前机器人精度校准

Figure 1 Preoperative precision proofreading of dental implant robot

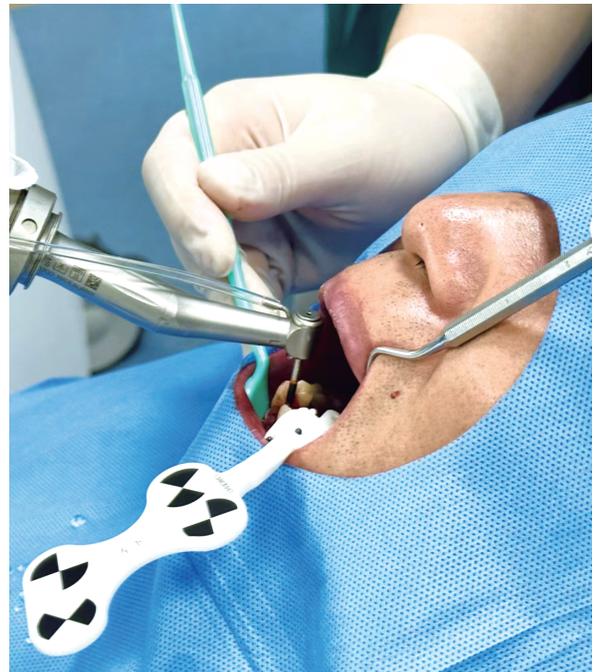


图2 口腔种植机器人自主备洞

Figure 2 Autonomous cavity preparation by dental implant robot

5 口腔种植机器人的研究进展

5.1 口腔种植机器人的操作精准性 目前国内对于口腔种植机器人的操作精准性与可靠性均进行了研究。YANG S 等人^[29]报道口腔种植机器人的根部、颈部及角度误差仅为 0.73 mm、0.74mm、1.11°。Rawal S 等人^[30]研究报道的根部、颈部稍大，分别为 0.85 mm、0.90 mm，但角度误差更小，仅为 0.53°。Bolding S L 等^[31]应用 Yomi 为 5 例患者实施种植手术，结果根尖、颈部误差均值为 0.95mm、1.04mm，角度误差均值为 2.56°，所有患者均未出现不良事件，但其指出，作为半自动化口腔种植机器人，手术操作过程中对于医生的临床经验要求较高。白石柱等人^[32]应用雅客智慧机器人进行种植手术并与数字化导板进行比较，结果显示雅客智慧机器人的精度优于导板，误差均不足 0.3 mm，这是目前临床研究报道的误差最小的研究。吴煜等人^[33]研究应用瑞医博机器人，其误差水平为 0.65mm 与 2.23°。YANG S 等人^[28]研究报道，全口无牙颌患者治疗中，应用口腔种植机器人可获得准确的温度反馈^[34-35]。

通过使用基于图像引导的用于牙种植手术的混合机器人 (Hybrid Robotic System for Dental Implant surgery, HRS-DIS)，FENG Y 等人^[36-38]采用一种称为混合机器人的 (HRS-DIS) 口腔种植辅助装置，这种机器人应用图像引导能够保持高度稳定性，应用于树脂模型，可完全避免钻针序列的误差。而且与动态导航比较其稳定

性更强^[38]。Jin X 等人^[39]研究测量了口腔种植机器人的精度，结果证实误差 (0.61mm、0.50mm、2.38°) 与数字化导板基本相同。

对于上颌骨重度萎缩的患者，实施种植手术难度显著增大且治疗结果难以预测。为应对此种难度更大的手术，必须提高口腔种植机器人的智能化程度。CAO Z G 等人^[40]通过集成 UR 机械臂与导航系统，并将这种机器人应用于头颅模型，结果显示，该口腔种植机器人能够准确植入颧种植体，精度大大优于自由手手术的精度，但该机器人目前还处于测试阶段。

目前已进入临床应用的口腔种植机器人较少，部分临床应用的机器人与精准度见表 1。虽然上述研究报道其精度较高，但由于临床研究数量较少，样本量也较小^[43]。许多口腔种植机器人还处于临床前的测试阶段，未来进行临床应用仍需更大量的研究数据支持。

5.2 口腔种植机器人关键技术的研究进展 光源追踪是口腔种植机器人进行定位的关键技术。加拿大 NDI 公司的 Polaris 光学定位系统，摄像机能够消除环境导致的噪声影响，通过光源或反射点探测固定在手术器械上的标记点，再利用摄像机的成像模型计算手术器械在三维空间的位置^[12]，从而达到亚毫米的定位精度和最高 4 kHz 以上的采集速率^[44]。机器人世界标定 (Robot-world Calibration) 是光学导航手术机器人系统提高手术精度的重要步骤，用于精确确定光学跟踪器与机器人之间的空间关系。LI Y 等人^[45]提出一

表 1 临床应用的口腔种植机器人型号与精准度
Table 1 Models and accuracy of dental implant robots for clinical application

临床研究	机器人型号	精准度
YANG S 等人 ^[28]	瑞医博口腔手术机器人	全口无牙颌种植手术中能获得
Rawal S 等人 ^[30]	Neocis Yomi 机器人	误差结果为颈部 0.90 mm、根尖 0.85 mm、角度偏 0.53°
Bolding S L 等人 ^[31]	Neocis Yomi 机器人	平均偏差颈部为 (1.04±0.70) mm，根尖 (0.95±0.73) mm，角度偏差 2.56°±1.48°，深度为 (0.42±0.46) mm
白石柱等人 ^[32]	雅客智慧机器人	误差 0.2~0.3 mm
吴煜等人 ^[33]	瑞医博口腔手术机器人	误差水平为 0.65mm 与 2.23°
CHEN J P 等人 ^[41]	THETA 种植体机器人系统	植体平台、尖端和成角的比较偏差分别为 0.58±0.31 mm、0.69±0.28 mm 和 1.08±0.66°
QIAO S C 等人 ^[42]	cobot 辅助种植机器人	平台偏差、顶点偏差和角偏差的均值 (SD) 分别为 0.37 (0.14) mm、0.44 (0.17) mm 和 0.75 (0.29) °

种全自动机器人世界标定方法，通过利用串联机器人的运动特性，采用最小二乘拟合算法计算机器人刀具中心点与机器人参考系的关系，得到机器人世界标定矩阵。应用这种标定矩阵的口腔种植机器人保持了较高的精度，平均距离偏差为 1.11 mm，平均角度偏差为 0.99°。此外，手术工具的操作范围不再受光学跟踪装置视觉范围的限制，不再需要将规划的植入物轨迹的光学跟踪装置调整到不同的位置和方向。

为增加口腔种植机器人的运动灵活性，研究者开发了 6 自由度机械臂。Yilmaz S 等人^[46]使用一个目标函数加大触觉装置的透明度，并计算效应器末端的扭矩以实施约束运动，优化了 6 自由度触觉机械臂的连接杆长度，平衡了杆的质量和惯性问题。通过使用 6 自由度机械臂，Sun X Y 等人^[18]基于体积分解的程序机器人可以在颌骨模型中制备天然牙根的形态，证明了机械臂的可预测性。

由于串行机器人刚度低，逆运动学解非唯一，可能降低机器人辅助手术的成功率和安全性。而并联机器人具有更大的刚度和独特的逆运动学，但其工作空间很小，可能无法满足手术要求。针对此问题 FENG Y 等人^[37]提出一种新型的混合动力种植牙机器人，由三个平移关节、两个转动关节和 Stewart 并联机构组成。Stewart 用于进行外科手术，关节用于扩大 Stewart 的工作空间。同时应用基于变导纳控制器的物理人机交互，以确保安全性。考虑到 Stewart 工作空间小的特点，采用幻影实验，经过 20 次迭代，得到了最小化 Stewart 关节运动的最优模型。

6 口腔种植机器人的优势与不足

口腔种植机器人具有多种优势：①降低手术过程中张口度的要求，突破手术视野不足引起的操作局限，增加术中能见度，清晰显示术区微环境，特别是对于后牙区的操作，以及不翻瓣手术时能够从显示器实时观察手术过程，操作更加便利^[31]。②能够不间断连续工作，仅靠脚踏就能完成手术，降低医生的工作强度，减少医生的职业暴露风险^[38]。③为实施远程手

术提供可能性，对于种植手术在基层医院的推广提供了便利。④能够智能选择钻针工作方式与速度，避免医生手部震颤导致的误差，提高治疗精度^[31]。⑤其稳定性与精度，可缩短医生的学习曲线^[38, 47]。

口腔种植机器人的不足：①目前口腔种植机器人结构复杂，需要的手术部件较多，需要专业的知识才能正确进行设备检查、维护及应用^[27]。②手术前必须进行标记点配准，手术过程中口腔必须佩戴标记物，可能延长椅旁时间，影响治疗舒适度，降低患者耐受性^[10, 12]。③机械臂移动速度较慢，必须延长患者术中张口时间，对于部分特殊患者，例如咽反射过于敏感，或者存在肌张力障碍的患者，可能难以耐受手术^[38]。

7 口腔种植机器人应用的伦理与法规问题

在推动口腔机器人技术发展的同时，也需要重视口腔机器人使用涉及的伦理与法规问题。

伦理方面主要涉及：①信息安全和隐私保护。口腔机器人在诊断和治疗过程中可能涉及患者的大量个人信息和敏感数据。医疗机构和研究团队需要制定严格的数据管理政策，确保这些信息不会被滥用或泄露，保障患者的隐私权。②决策透明性和责任问题。口腔机器人在决策过程中可能存在“黑盒子”现象，即其决策逻辑和推理过程不透明。这给医生和患者带来了信任和责任的问题，需要明确机器人的决策逻辑，并建立透明的决策机制。医生和患者应当能够理解和参与到决策过程中，确保决策的合理性与可接受性。③人际关系和情感需求。口腔机器人的广泛应用可能改变传统的医患互动方式，使得医患关系变得更加机械化和冷漠。这可能对患者的心理和情感需求造成影响，需要关注患者在使用口腔机器人过程中的情感体验。

法规方面主要涉及：①注册和备案。根据《医疗器械监督管理条例》，进口或国产的口腔机器人需要获得相应的注册或备案证书方可上市使用。这需要企业提交相应的申请资料，

包括产品的安全性、有效性等方面的证明文件。

②使用期限和追溯性。根据《有源医疗器械使用期限注册技术审查指导原则》，口腔机器人也有其使用期限。医疗器械使用单位应当确保信息具有可追溯性，对使用期限长的大型医疗器械，应当逐台建立使用档案，记录其使用、维护、转让、实际使用时间等事项。

③责任和法律后果。如果由于口腔机器人技术错误或算法偏差导致了错误诊断或不当治疗，需要明确责任归属和法律后果。这需要建立相关的法律框架与规定，明确技术使用的范围和限制，以及可能的法律后果。

8 展望

随着口腔医学数字化的发展，机器人辅助口腔手术的时代已经到来。口腔种植机器人正在改变传统口腔种植的手术方式，将“精准种植”推进到一个新的高度。这一巨大的技术突破无疑具有深远的发展前景。口腔种植机器人在牙齿种植领域应用的重要性和潜力体现在：①提高手术效率和准确性。口腔种植机器人技术能够精确地完成种植手术，避免了传统手术中可能出现的误差和并发症，提高了手术效率和准确性。

②减轻患者痛苦。通过微创术式，口腔种植机器人技术能够减轻患者的手术痛苦和术后恢复时间，提高患者的满意度和生活质量。

③拓展应用领域。随着技术的不断进步和应用的不断拓展，口腔种植机器人技术有望在口腔其他疾病的治疗中发挥作用，如正畸、牙周病等。

可以预期未来口腔种植机器人技术创新的主要方向是：①精准化与个性化。通过数字化模拟技术，机器人手术系统能够基于患者的口腔数据和种植专家的经验，设计出更加精确与个性化的种植方案，实现精准定位、精准种植。

②微创化。为了减少手术创伤和术后恢复时间，口腔种植机器人技术正致力于开发无切口、无翻瓣等微创术式，使手术更加简便、舒适。

③自动化与智能化。随着口腔医学机器人研究与应用深度的不断增加，未来有望实现口腔种植手术的全自动化技术，提高手术效率和准确

性。

④多学科或跨学科的可能性。口腔种植机器人技术涉及医学、生物力学、机械学、计算机图形学、计算机视觉等多个学科的知识，这种跨学科的合作使得手术机器人技术在口腔种植领域的应用更加广泛和深入。

目前口腔种植机器人的应用仍存在某些障碍，一是技术费用极其昂贵；二是医生对专业知识的掌握仍不够深入，临床接受度仍未达到预期。临床需求是创新的源动力，口腔种植机器人在临床应用中的推广一方面要提高可操控性，另一方面要加强临床医生的数字化技能培训，加强智能机器人工程师与临床医生的合作交流。工作空间与手术视野受限是口腔手术的一大障碍，未来口腔种植机器人的开发将朝着构造更加小巧、节能，配备更加灵敏的术野显示与误差监测系统，注册方式更加便捷等方向发展。虽然目前口腔种植机器人的临床应用还较少，但是随着人工智能技术的日益完善，口腔种植机器人的应用将会促使现代口腔诊疗更加精准化、微创化，惠及更多患者。

利益冲突声明： 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明： 赵梦雨负责设计论文框架，起草论文，撰写论文并最后定稿；张艳萍、周如丽负责查阅文献；朱万春负责论文修改。

参考文献

- [1] Buser D, Sennerby L, Bruyn H D. Modern implant dentistry based on osseointegration: 50 years of progress, current trends and open questions[J]. *Periodontol* 2000, 2017, 73(1): 7-21.
- [2] 时权, 王俊成, 刘洪臣. 口腔种植教学中全科医学思维的培养[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2019, 20(6): 347-350.
- [3] Chen S T, Buser D. Esthetic outcomes following immediate and early implant placement in the anterior maxilla a systematic review[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2014, 29 Suppl: 186-215.
- [4] Tahmaseb A, Wismeijer D, Coucke W, et al. Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2014, 29 Suppl: 25-42.
- [5] 刘丹丹, 赵文迪, 牛菊, 等. 机器人在口腔医学中的应用进展[J]. *华西口腔医学杂志*, 2020, 38(1): 90-94.
- [6] CHEN S, OU Q M, LIN X F, et al. Comparison between a computer-aided surgical template and the free-hand method: a systematic review and meta-analysis[J]. *Implant Dent*, 2019, 28(6): 578-589.
- [7] Orban K, Varga E Jr, Windisch P, et al. Accuracy of half-guided implant placement with machine-driven or manual insertion: a prospective, randomized clinical study[J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26(1): 1035-1043.
- [8] Ahmad P, Alam M K, Aldajani A, et al. Dental robotics: a disruptive technology[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(10): 3308.
- [9] Rao Y, Parimi A M, Rahul D, et al. Robotics in Dental Implantation[J]. *Mater Today Proc*, 2017, 4(8): 9327-9332.

- [10] Block M S, Emery R W. Static or dynamic navigation for implant placement-choosing the method of guidance[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2016, 74(2): 269-277.
- [11] Chackartchi T, Romanos G E, Parkanyi L, et al. Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes[J]. *Periodontol* 2000, 2022, 88(1): 64-72.
- [12] 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.
- [13] Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, et al. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review[J]. *Ann Anat*, 2019, 225: 1-10.
- [14] Sun X, McKenzie F D, Bawab S, et al. Automated dental implantation using image-guided robotics: registration results[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2011, 6(5): 627-634.
- [15] Boesecke R, Brief J, Raczkowsky J, et al. Robot assistant for dental implantology[J]. *Int Poster J Dent Oral Med*, 2002, 4(1): 109.
- [16] Pires J N, Caramelo F J, Brito P, et al. Robotics in implant dentistry: stress/strain analysis. system overview and experiments[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2006, 33(5): 373-380.
- [17] Wilmes B, Su Y Y, Drescher D. Insertion angle impact on primary stability of orthodontic miniimplants[J]. *Angle Orthod*, 2008, 78(6): 1065-1070.
- [18] Sun X Y, Yoon Y K, Li J, et al. Automated image-guided surgery for common and complex dental implants[J]. *J Med Eng Technol*. 2014, 38(5): 251-259.
- [19] Yu K, Uozumi S, Ohnishi K, et al. Stereo vision based robot navigation system using modulated potential field for implant surgery[C]. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology(ICIT), 2015 Jun 16, 493-498.
- [20] Mozer P S. 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.
- [21] 柯怡芳, 张耀鹏, 王勇, 等. 机器人在口腔修复领域的研发及应用现状 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2021, 56(9): 939-944.
- [22] WU Y, WANG F, FAN S C, et al. Robotics in dental implantology[J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2019, 31(3): 513-518.
- [23] Widmann G, Stoffner R, Schullian P, et al. Comparison of the accuracy of invasive and noninvasive registration methods for image-guided oral implant surgery[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2010, 25(3): 491-498.
- [24] 谢瑞, 白石柱, 赵铁民. 自主式口腔种植机器人在美学区种植病例中的应用 [C]. 2021 年中华口腔医学会口腔颌面修复专业委员会第六次全国口腔颌面修复学学术年会, 中国广州, 2021.
- [25] Galanis C C, Sfantsikopoulos M M, Koidis P T, et al. Computer methods for automating preoperative dental implant planning: implant positioning and size assignment[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2007, 86(1): 30-38.
- [26] 赵雯, 谢瑞, 吴楠, 等. 自主式种植牙手术机器人口腔种植体植入术的标准护理流程 [J]. *机器人外科学杂志 (中英文)*, 2022, 3(6): 482-487.
- [27] 张凯, 余孟流, 曹聪, 等. 种植手术机器人辅助完成种植手术精度的初步研究 [J]. *中国医疗器械信息*, 2021, 27(21): 25-28, 53.
- [28] YANG S, CHEN J H, LI A, et al. Autonomous robotic surgery for immediately loaded implant-supported maxillary full-arch prosthesis: a case report[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(21): 6594.
- [29] YANG S, CHEN J H, LI A, et al. Accuracy of autonomous robotic surgery for single-tooth implant placement: a case series[J]. *J Dent*, 2023, 132: 104451.
- [30] Rawal S, Tillery D E Jr, Brewer P. Robotic-assisted prosthetically driven planning and immediate placement of a dental implant[J]. *Compend Contin Educ Dent*, 2020, 41(1): 26-30.
- [31] Bolding S L, Reebye U N. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(4): 639-647.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] CHENG K J, KAN T S, LIU Y F, et al. Accuracy of dental implant surgery with robotic position feedback and registration algorithm: an in-vitro study[J]. *Comput Biol Med*, 2021, 129(2208): 104153.
- [35] KAN T S, CHENG K J, LIU Y F, et al. Evaluation of a customdesigned human-robot collaboration control system for dental implant robot[J]. *Int J Med Robot*, 2022, 18(1): e2346.
- [36] TAO B X, FENG Y, FAN X Q, et al. The accuracy of a novel imageguided hybrid robotic system for dental implant placement: an in vitro study[J]. *Int J Med Robot*, 2023, 19(1): e2452.
- [37] FENG Y, FAN J C, TAO B X, et al. An image-guided hybrid robot system for dental implant surgery[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2022, 17(1): 15-26.
- [38] TAO B X, FENG Y, FAN X Q, et al. Accuracy of dental implant surgery using dynamic navigation and robotic systems: an in vitro study[J]. *J Dent*, 2022, 123: 104170.
- [39] Jin X, Kim R, Park J M, et al. Accuracy of surgical robot system compared to surgical guide for dental implant placement: a pilot study[J]. *J Implant Appl Sci*, 2022, 26(1): 27-38.
- [40] CAO Z G, QIN C X, FAN S C, et al. Pilot study of a surgical robot system for zygomatic implant placement[J]. *Med Eng Phys*, 2020, 75: 72-78.
- [41] CHEN J P, BAI X L, DING Y D, et al. Comparison the accuracy of a novel implant robot surgery and dynamic navigation system in dental implant surgery: an in vitro pilot study[J]. *BMC Oral Health*, 2023, 23(1): 179.
- [42] QIAO S C, WU X Y, SHI J Y, et al. Accuracy and safety of a haptic operated and machine vision controlled collaborative robot for dental implant placement: A translational study[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2023, 34(8): 839-849.
- [43] LI Z W, XIE R, BAI S Z, et al. Implant placement with an autonomous dental implant robot: a clinical report[J]. *J Prosthet Dent*, 2023, S0022-3913(23)00124-5.
- [44] Fattori G, Lomax A J, Weber D C, et al. Technical assessment of the NDI Polaris Vega optica tracking system[J]. *Radiat Oncol*, 2021, 16(1): 87.
- [45] LI Y, HU J L, TAO B X, et al. Automatic robot-world calibration in an optical-navigated surgical robot system and its application for oral implant placement[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2020, 15(10): 1685-1692.
- [46] Yilmaz S, Konukseven E I, Gurocak H. Optimum design of 6R passive haptic robotic arm for implant surgery[C]. *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, 2010, 105-110.
- [47] Pellegrino G, Bellini P, Cavallini P F, et al. Dynamic navigation in dental implantology: the influence of surgical experience on implant placement accuracy and operating time. An in vitro study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(6): 2153.

编辑：赵敏