

口内扫描配准种植机器人在种植牙手术中的应用

靳能皓^{1,2} 乔波^{1,2} 朱亮^{1,2} 孟凡皓^{2,3} 林权泉^{2,4} 李粮博^{1,2}

邢乐君¹ 赵睿^{2,5} 张海钟¹

1. 解放军总医院第一医学中心口腔颌面外科, 北京 100853; 2. 解放军医学院, 北京 100853;
3. 首都医科大学附属北京友谊医院口腔科, 北京 100050;
4. 解放军总医院第六医学中心口腔科, 北京 100048; 5. 北京瑞医博口腔诊所, 北京 100080

[摘要] **目的** 探讨口内扫描与锥形束CT (CBCT) 术前配准在口腔种植机器人辅助种植牙手术中的应用。方法 回顾性分析2023年11月—2024年5月机器人辅助种植的牙列缺损病例资料40例, 手术前将佩戴定位标志物的口内扫描数据与CBCT数据分别与初始CBCT图像自动配准融合并计算配准误差, 术中计算定位标志物注册平均误差并对术后的植入精度进行分析。**结果** 40例牙列缺损患者佩戴定位标志物的口内扫描数据和CBCT数据分别与初始CBCT影像均成功配准融合, 配准误差值分别为(0.157±0.026) mm和(0.154±0.033) mm, 统计学分析表明二者差异无统计学意义。定位标志物注册误差值为(0.037 3±0.003 6) mm。共完成55枚种植体植入, 植入点、根尖点的总误差分别为(0.78±0.41)、(0.89±0.28) mm, 横向误差分别为(0.44±0.36)、(0.58±0.25) mm, 深度误差分别为(0.51±0.32)、(0.54±0.36) mm; 植入角度误差为1.24°±0.67°。**结论** 基于口内扫描与CBCT配准融合技术能够满足口腔种植机器人术前配准的精度需求, 增加了机器人辅助种植牙手术术前配准方式的选择并减少了患者多次辐射暴露。

[关键词] 牙种植; 计算机辅助设计; 机器人外科手术; 口内扫描

[中图分类号] R783 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2024.2024213



本文链接 开放科学标识码

Application of intraoral scanning registration implant robot in dental implant surgery

Jin Nenghao^{1,2}, Qiao Bo^{1,2}, Zhu Liang^{1,2}, Meng Fanhao^{2,3}, Lin Quanquan^{2,4}, Li Liangbo^{1,2}, Xing Lejun¹, Zhao Rui^{2,5}, Zhang Haizhong¹

1. Dept. of Oral and Maxillofacial Surgery, The First Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; 2. Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; 3. Dept. of Stomatology, Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China; 4. Dept. of Stomatology, The Sixth Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China; 5. Beijing Ruiyibo Dental Clinic, Beijing 100080, China

Supported by: Beijing Natural Science Foundation-Haidian Original Innovation Joint Fund Project (L212010)

Correspondence: Zhang Haizhong, E-mail: zhanghaizhong@301hospital.com.cn; Zhao Rui, E-mail: 13641243467@163.com

[Abstract] **Objective** This paper aims to investigate the application of intraoral scanning and cone beam computed tomography (CBCT) registration implant robot in dental implant surgery. **Methods** The data of 40 cases with dental defect of robot-assisted implantation from November 2023 to May 2024 were retrospectively analyzed. Before the operation,

the intraoral scan data and CBCT data of the positioning markers were automatically fused with the initial CBCT images, and the registration error was calculated. The average registration error of positioning markers was determined during the operation, and the implantation accuracy was analyzed after the operation. **Results** The intraoral scan data and CBCT data of 40 patients with

[收稿日期] 2024-05-30; **[修回日期]** 2024-09-11

[基金项目] 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金 (L2120-10)

[作者简介] 靳能皓, 主治医师, 博士, E-mail: jinnenghao301@163.com; 乔波, 主治医师, 博士, E-mail: qiaobo301@126.com

[通信作者] 张海钟, 教授, 主任医师, 博士, E-mail: zhanghaizhong@301hospital.com.cn; 赵睿, 主治医师, 博士, E-mail: 13641243467@163.com

dental defect wearing positioning markers were successfully registered with the initial CBCT image, and the registration errors were (0.157 ± 0.026) mm and (0.154 ± 0.033) mm, respectively. Statistical analysis showed no statistical significance between them. The registration errors of the marker was $(0.037\ 3\pm 0.003\ 6)$ mm. A total of 55 implants were performed, and the total deviations of the implant point and the apical point were (0.78 ± 0.41) and (0.89 ± 0.28) mm, respectively. The transverse deviations of the implant point and the apical point were (0.44 ± 0.36) and (0.58 ± 0.25) mm, respectively. The depth deviations of the implant point and the apical point were (0.51 ± 0.32) and (0.54 ± 0.36) mm, respectively. The deviation of the implant angle was $1.24^\circ\pm 0.67^\circ$. **Conclusion** The fusion technology based on intraoral scanning and CBCT registration can meet the accuracy requirements of preoperative registration of oral implant robots. The technology increases the choice of registration methods before robot-assisted dental implant surgery and reduces the multiple radiation exposures of the patient.

[Key words] dental implant; computer-aided design; robotic surgery; intraoral scanning

随着种植技术的不断发展,种植义齿修复已成为牙列缺损或牙列缺失最理想的修复方法。为获得更优的种植效果,计算机辅助种植(computer-aided implant, CAI)技术为种植体植入提供了个性化、精准化手术方法^[1]。目前CAI技术可分为静态3D打印导板系统、动态手术导航系统及种植机器人系统^[2]。口腔种植机器人具备实时显示术区影像、及时更改手术方案和提高钻孔及植体植入的机械稳定性等优势^[3-5]。但是动态手术导航和种植机器人系统往往需要患者佩戴特定的定位标志物后再次进行锥形束CT(cone beam computed tomography, CBCT)检查以期提供牙颌的空间坐标,产生的X线辐射可能会造成患者的担忧和困扰。口内扫描基于光学扫描技术的原理,在临床中获取临床牙列和周围软组织等信息方面具有独特的优势^[6]。但目前使用口内扫描仪识别定位标志物用于口腔动态导航手术的研究较少。基于以上背景本课题组使用口内扫描仪获取患者口内牙列与定位标志物空间坐标数据,用于机器人种植牙术前影像学配准,并分析其对机器人辅助种植牙的精度误差,为临床应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究对象

回顾性分析2023年11月—2024年5月使用机器人辅助种植的牙列缺损患者40例。研究通过解放军总医院医学伦理委员会批准(伦理批件编号:2022KY137-KS002),术前告知患者及家属治疗方案及手术风险,患者及家属均表示知情同意并签署知情同意书。

纳入标准:1)年龄大于18周岁;2)全身情况基本健康,可耐受种植牙手术,口腔卫生情况

可;3)无严重骨缺损;4)张口度大于30 mm。

排除标准:1)有严重的出血倾向(血小板 $< 50\times 10^9$ 和凝血功能严重紊乱,凝血酶原时间 > 18 s,凝血酶原活动度 $< 40\%$);2)严重全身性疾病(如糖尿病、高血压等);3)严重牙周病,口腔卫生情况差;4)大量吸烟及饮酒者;5)口腔或颌骨有未控制的炎症、良性或恶性肿瘤及颌骨疾病。

1.2 手术规划及设备

初次诊疗患者拍摄CBCT后以DICOM格式保存,导入种植机器人导航软件(RemeDent V3.0,北京柏惠维康科技公司)进行图像的三维重建处理,对上下颌骨、上颌窦、下牙槽神经管等感兴趣区域自动分割,并对缺失牙位进行高度、近远中宽度及颊舌向宽度的骨量测量。在种植机器人导航软件选定种植系统和种植体型号,规划植入位置,完成手术规划。

使用临时冠桥树脂材料(ProtempTM, 3M公司,美国)将带有陶瓷球的定位标志物(北京柏惠维康科技公司)黏贴于患者口内同颌对侧2~3颗牙齿表面。患者佩戴标志物后行CBCT(NewTom公司,意大利)检查,以DICOM格式导出。患者入手术间取仰卧位,使用口内扫描仪(Trios3, 3Shape公司,丹麦)获取含有定位标志物的口腔内牙齿扫描数据,以STL格式导出。所有操作由1名具备丰富临床经验和口内扫描经验的医生完成。使用种植机器人导航软件分别将带有定位标志物的口内扫描数据和CBCT数据与初始CBCT影像进行自动配准融合,手动标注识别点,计算配准误差。

1.3 手术过程

患者取仰卧位,术区常规消毒铺单,使用4%阿替卡因肾上腺素注射液局部浸润麻醉。基于配准融合后的影像数据,种植机器人导航软件自动

提取定位标志物在影像学的空间坐标系位置，借助光学追踪定位仪识别完成患者注册，然后通过光学追踪定位仪对将带有标定板的机械臂进行四象限的识别标定，机械臂注册完成。注册完成后可实现对患者、种植机器人机械臂和光学追踪定位仪的空间位置匹配。

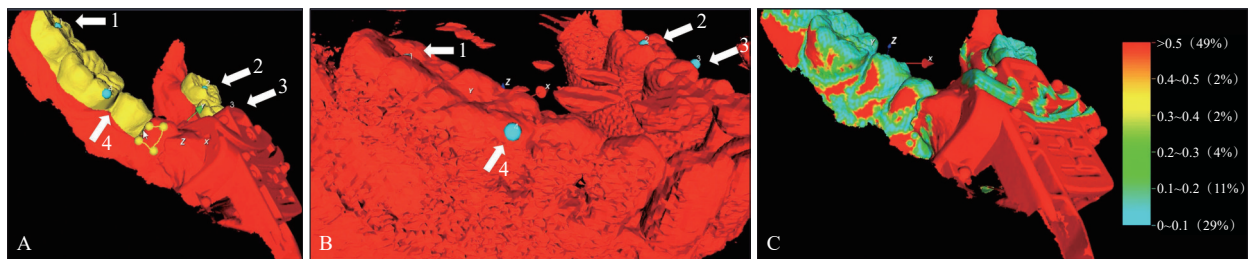
术者将机械臂移动至术区，机器人完成自动校准，根据术前手术规划，机械臂自动进行种植窝洞预备，达到规划深度及角度后选定植入模式完成种植体自动植入，术者验证所有位点种植体的初期稳定性均大于 35 N·cm。根据植入位置、深

度及角度评估，保证种植体初期稳定性条件下可选择安放封闭螺丝或愈合基台。术区减张缝合，拆除定位标志物，手术完成。术后口服抗生素，必要时口服镇痛药。

1.4 评价指标

1.4.1 配准融合精度分析

使用种植机器人导航软件分别将带有定位标志物的口内扫描数据和CBCT数据与初始CBCT影像自动配准融合，选定4个感兴趣位点作为验证点(图1)，计算配准误差值。



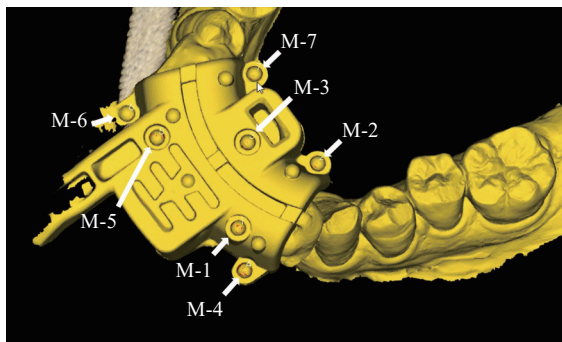
A: 带定位标志物的口内扫描重建图像; B: CBCT重建图像; C: 口内扫描数据与CBCT配准融合后图像。白色箭头1~4点为特征性感兴趣位点，如牙尖、窝、脊等区域。

图 1 口内扫描数据与初始CBCT数据配准融合

Fig 1 Registration fusion of intraoral scanning data and initial CBCT data

1.4.2 定位标志物注册精度分析

用种植机器人导航软件进行术前患者注册，使用光学追踪定位仪分别对定位标志物的7个陶瓷球位点进行空间识别定位(图2)，计算定位标志物注册精度误差。



白色箭头M1~M7分别为标定的7个定位标志物识别点。

图 2 患者佩戴定位标志物后进行机器人-患者注册

Fig 2 Patients wear positioning markers for robot-patient registration

1.4.3 种植精度分析

患者术后行CBCT检查，以DICOM格式导入种植机器人导航软件，使用术后验证模块，对种植体实际植入位置和术前手术规划的图像进行虚拟叠加，以评估种植机器人辅助手术的精准性，分别计算植入点、根尖点的总误差、横向误差、

深度误差及植入角度误差。

1.5 统计学方法

采用SPSS 21.0软件进行统计学分析，计量资料使用均数±标准差表示，计数资料以例数或率(%)表示。采用配对t检验对口内扫描配准与CBCT配准的误差进行统计学分析，检验水准α=0.05。使用Shapiro-Wilk检验分别检查植入点、根尖点的总误差、横向误差、深度误差及植入角度误差等变量数据是否符合正态分布，P>0.05表明变量数据符合正态分布。

2 结果

2.1 临床资料特点

研究纳入牙列缺损患者共40例，其中男性18例，女性22例；年龄33~70岁，平均年龄(56.23±17.65)岁。在种植机器人辅助下共植入55颗种植体，其中使用士卓曼种植体(Straumann公司，瑞士)45枚，其中BL钛锆种植体7枚，BLT钛锆种植体15枚，BLT亲水钛锆种植体8枚，美学钛锆种植体10枚，美学亲水钛锆种植体5枚；使用登腾种植体(Dentium公司，韩国)10枚，型号均为SuperLine II。

2.2 术前配准误差分析

40例牙列缺损患者佩戴定位标志物后获得的口内扫描数据和CBCT数据分别与初始CBCT数据均成功配准融合, 每例患者的配准融合误差值由4个感兴趣位点的配准误差平均值获得。40例口内扫描数据与初始CBCT配准融合误差绝对值的均值为(0.157±0.026) mm, 佩戴定位标志物的CBCT数据与初始CBCT配准融合误差绝对值的均值为(0.154±0.033) mm, 统计学分析表明两种配准误差绝对值的差异无统计学意义($P=0.476$)。

2.3 定位标志物注册精度分析

使用RemeDent V3.0软件对40例牙列缺损患者进行术前机器人-患者注册, 分别对定位标志物的7个陶瓷球位点进行空间识别定位, 计算定位标志物注册平均误差值; 40例定位标志物注册误差绝对值的均值为(0.037 3±0.003 6) mm。

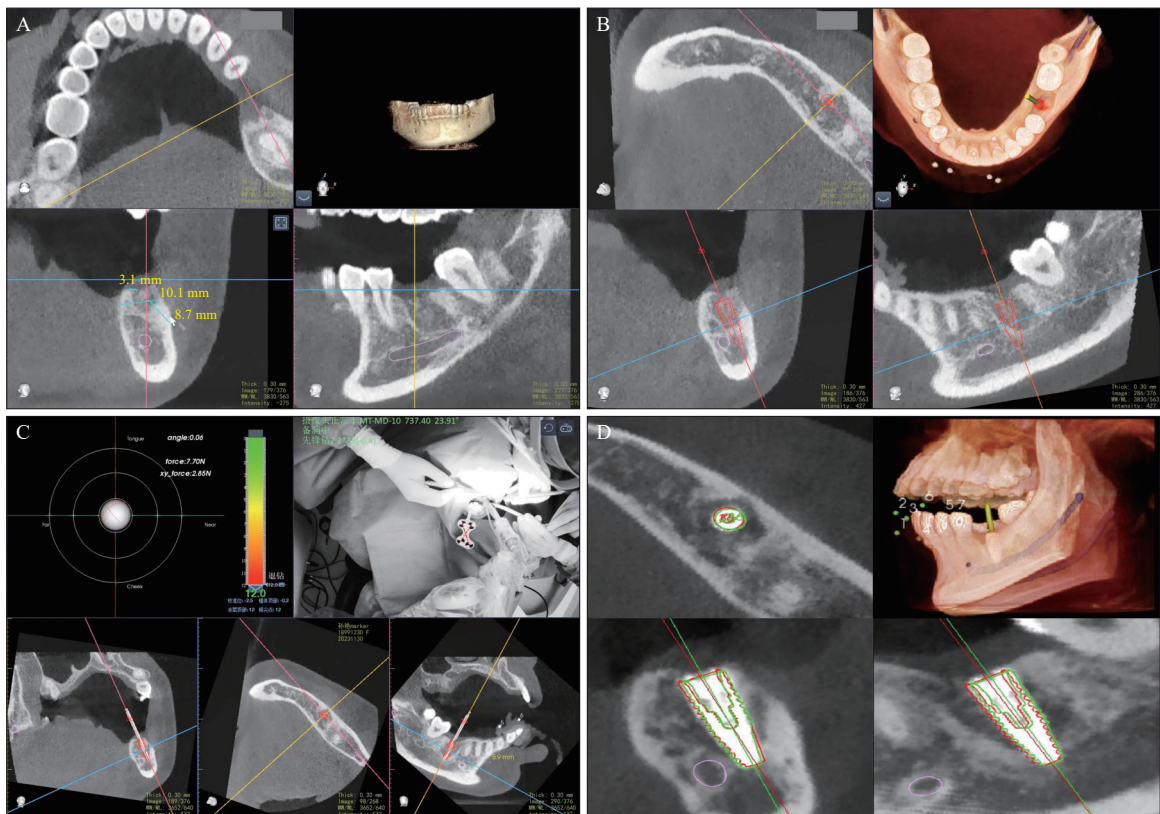
2.4 机器人辅助种植术后误差统计

使用Shapiro-Wilk检验分别检查55个种植位点术后植入点、根尖点的总误差、横向误差和深度误差及植入角度误差, 结果显示 P 值均大于0.05, 表明以上变量均符合正态分布。植入点、根尖点

总误差分别为(0.78±0.41)、(0.89±0.28) mm, 横向误差分别为(0.44±0.36)、(0.58±0.25) mm, 深度误差分别为(0.51±0.32)、(0.54±0.36) mm; 植入角度误差为 $1.24^{\circ}\pm 0.67^{\circ}$ 。

2.5 典型病例

患者, 女, 36牙拔除半年余, CBCT可见36牙拔牙窝空虚, 骨质愈合不良; 骨量测量显示: 颊舌径10.1 mm, 舌侧牙槽嵴宽度为3.1 mm, 颊侧骨质较差, 拔牙窝底距离下牙槽神经管顶高度约9 mm(图3A); 种植方案拟使用Straumann Bone Level Tapered Roxolid SLA、4.1 mm×12 mm(直径×长度)种植体, 种植角度偏颊, 避开下牙槽神经管(图3B)。术前下颌前牙区黏贴定位marker, 并进行3Shape口内扫描与CBCT配准, 术中患者与机械臂注册完成后, 在种植机器人辅助下完成种植窝洞预备和种植体植入(图3C)。戴入封闭螺丝, 缝合, 术后再行CBCT对种植机器人辅助种植进行评估(图3D)。植入点、根尖点总误差分别为0.55、0.44 mm, 横向误差分别为0.51、0.40 mm, 深度误差分别为0.20、0.18 mm; 植入角度误差为 1.31° 。



A: 术前骨量测量; B: 规划种植体型号、尺寸及种植位点; C: 术中在种植机器人辅助下完成种植窝洞预备和种植体植入; D: 术后精度分析, 红色为术前规划位置, 绿色为实际植入位置。

图3 种植机器人种植牙手术流程

Fig 3 Surgical procedure of robotic dental implant

3 讨论

我国第四次全国口腔健康流行病学调查显示,口腔内牙缺失的发病率随着年龄增长而显著提高^[7]。口腔种植修复是当前牙缺失的首选治疗方式^[8]。种植手术最初是由医生凭经验制定手术方案并自由手完成手术,对于种植方向和深度难以掌控;数字化3D打印种植导板的出现为种植体的植入位置、深度和角度的精准植入提供了较优的种植效果,但仍存在导板制作过程烦琐、成本高、受患者张口度影响及导板阻碍种植钻头的冷却水进入种植窝等缺点^[9]。为提高种植手术精准度和减少术后并发症,机器人辅助口腔种植手术的出现也为年轻医生提供了更多的帮助和指导。

机器人种植手术系统是通过实时定向导航,在机械臂的引导下植入种植体;按照控制方式可分为被动式和自主式,对于感知目标区域的类型可分为光学感知和物理感知^[10]。2021年国家药品监督管理局批准两款口腔种植机器人应用于口腔种植牙手术,标志着我国口腔种植手术进入“机器人”时代^[11-12]。本研究所使用的口腔种植机器人是我国自主研发的第一台自主式、光学感知式口腔种植机器人。该款种植机器人能够捕捉光学部位折射的不可见光,辅助种植过程不易受环境光的影响;并且能够根据术前规划由机械臂自主进行窝洞预备,术者只需对植入过程进行监管和更换钻头,大大减少了在窝洞预备和植体植入过程中的人为操作误差。

目前对于机器人与患者之间的配准方式主要分为有标记点配准和无标记点配准,有标记点配准可分为侵入性配准和非侵入性配准。验证配准精度的金标准是侵入性配准标记,通过将特制的骨内配准装置安置在患者的牙槽骨内进行识别^[13-14]。在临床中较常用的配准方式则为非侵入性配准(识别固定于患者口内或口外的无创标志点),如佩戴“含硅橡胶印记的U型管”“基于口内扫描数据制作的3D打印定位导板”及本研究中所使用的定位标志物,该标志物内部含有7颗放射标记点的磁珠,佩戴标志物后进行CBCT检查;机器人导航软件能够对CBCT中包含的放射标记点进行识别,获得标志点的空间定位坐标,二者叠加后可完成患者口内标记点与CBCT影像的配准^[15-16]。

口内扫描仪是基于光学扫描技术在临床数字化诊疗过程中对口腔内牙列、咬合等数据进行采

集的设备^[6,17]。在本研究中通过使用口内扫描仪对牙列缺失患者的牙列及佩戴的定位标志物进行扫描重建,口腔种植机器人导航软件能够特异性识别口内扫描数据和初诊拍摄CBCT数据中标记的感兴趣区域,并将口内扫描和CBCT数据与初始CBCT数据进行融合,两种配准误差绝对值的差异无统计学意义,满足临床配准要求。但扫描仪的类型、扫描过程中温度及光照强度等外界因素、牙齿表面粗糙度等患者因素可能造成在提取牙列数据的过程中产生误差,可能与CBCT的配准融合产生误差^[18-19]。在临床操作中,使用口内扫描仪进行口内扫描及与初始CBCT配准融合的时间相较于佩戴标志物后进行CBCT检查和配准的时间更久,操作难度更高。但在机器人辅助种植手术前使用口内扫描仪对患者牙齿进行扫描重建及与初始CBCT配准,不仅能够减少患者术前可能受到的辐射损害,对于后期牙冠修复也发挥重要的意义。

目前口内扫描配准CBCT用于口腔种植机器人术前定位技术的研究较少,为保证机器人辅助种植牙的精准性,本研究对患者的术前定位仍选择了佩戴定位标志物后拍摄CBCT进行配准。Yang等^[20-21]使用口腔种植机器人在单颗牙种植手术及全口无牙颌种植手术中证明了机器人辅助种植相比于传统自由手手术,能够突破术中操作视野及手术带来的操作局限性,在后牙区种植更加便利。本研究对55个种植位点术后植入点、根尖点的总误差、横向误差和深度误差及植入角度误差进行分析,结果也验证了口腔种植机器人辅助种植手术所具备的精准性。但所纳入样本量相对较少,在未来的研究中仍需进一步提高口内扫描与CBCT配准的精准度,以期实现基于口内扫描识别定位标志物用于机器人辅助种植牙手术的临床方案。

综上所述,基于口内扫描与CBCT配准融合技术能够满足口腔种植机器人术前定位识别的需求,增加了机器人辅助种植手术术前配准的方式选择,并且能够减少患者术前可能受到更多的辐射损害,对临床诊疗有较大的价值。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] 徐淑兰,李平. 机器人辅助口腔种植体植入术:机遇与挑战[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(3): 140-145.
Xu SL, Li P. Robotic computer-assisted implant surgery: opportunities and challenges[J]. Chin J Oral Implantol,

- 2023, 28(3): 140-145.
- [2] Rao Y, Parimi AM, Rahul D, et al. Robotics in dental implantation[J]. *Mater Today Proc*, 2017, 4(8): 9327-9332.
- [3] Chackartchi T, Romanos GE, Parkanyi L, et al. Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes[J]. *Periodontol* 2000, 2022, 88(1): 64-72.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 奚祺, 吴国锋. 数字化口内扫描技术的发展与应用[J]. *实用口腔医学杂志*, 2021, 37(1): 136-140.
- Xi Q, Wu GF. Development and application of digital intraoral scanning technology[J]. *J Pract Stomatol*, 2021, 37(1): 136-140.
- [7] 王兴. 第四次全国口腔健康流行病学调查报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2018.
- Wang X. The fourth national oral health epidemiological survey report[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018.
- [8] Berglundh T, Armitage G, Araujo MG, et al. Peri-implant diseases and conditions: consensus report of workgroup 4 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions[J]. *J Periodontol*, 2018, 89 (Suppl 1): S313-S318.
- [9] Jorba-García A, González-Barnadas A, Camps-Font O, et al. Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Oral Investig*, 2021, 25(5): 2479-2494.
- [10] 陈江. 机器人在口腔种植领域的应用[J]. *中国口腔种植学杂志*, 2022, 27(5): 274-279.
- Chen J. Application of robots in the field of dental implantology[J]. *Chin J Oral Implantol*, 2022, 27(5): 274-279.
- [11] 北京柏惠维康科技股份有限公司. 口腔种植手术导航定位设备: 国械注准 20213010215[P/OL]. <https://www.nmpa.gov.cn/datasearch/search-result.html>.
- Beijing BaihuiWeikang Technology Co., LTD. Navigation and positioning equipment for oral implant surgery: National instrument registration 20213010215[P/OL]. <https://www.nmpa.gov.cn/datasearch/search-result.html>.
- [12] 雅客智慧(北京)科技有限公司. 口腔种植手术导航定位设备: 国械注准 20213010713[P/OL]. <https://www.nmpa.gov.cn/datasearch/search-result.html>.
- Yake Wisdom (Beijing) Technology Co., LTD. Oral planting surgery navigation and positioning equipment: the machinery note quasi 20213010713[P/OL]. <https://www.nmpa.gov.cn/datasearch/search-result.html>.
- [13] Wang F, Bornstein MM, Hung K, et al. Application of real-time surgical navigation for zygomatic implant insertion in patients with severely atrophic maxilla[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2018, 76(1): 80-87.
- [14] Hung KF, Wang F, Wang HW, et al. Accuracy of a real-time surgical navigation system for the placement of quad zygomatic implants in the severe atrophic maxilla: a pilot clinical study[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2017, 19(3): 458-465.
- [15] Stefanelli LV, DeGroot BS, Lipton DI, et al. Accuracy of a dynamic dental implant navigation system in a private practice[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2019, 34(1): 205-213.
- [16] 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.
- Man Y, Yang MT. Progress in clinical application of implant robotics, dynamic navigation system and full-guide template in the field of oral implantology[J]. *Chin J Oral Implantol*, 2023, 28(3): 146-151.
- [17] Burzynski JA, Firestone AR, Beck FM, et al. Comparison of digital intraoral scanners and alginate impressions: time and patient satisfaction[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2018, 153(4): 534-541.
- [18] Revilla-León M, Kois DE, Kois JC. A guide for maximizing the accuracy of intraoral digital scans: part 2-patient factors[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2023, 35(1): 241-249.
- [19] Revilla-León M, Subramanian SG, Özcan M, et al. Clinical study of the influence of ambient lighting conditions on the mesh quality of an intraoral scanner[J]. *J Prosthodont*, 2020, 29(8): 651-655.
- [20] 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.
- [21] Yang S, Chen J, 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.