

人工智能在口腔修复诊疗中的应用与进展

戴雨霖 张新春

中山大学附属口腔医院, 光华口腔医学院, 广东省口腔医学重点实验室, 广东省口腔疾病临床医学研究中心, 广州 510055

通信作者: 张新春, Email: zhxinch@mail.sysu.edu.cn

【摘要】 数字化与信息技术是21世纪以来口腔医学的主旋律,尤其在口腔修复医学中,人工智能(AI)技术的应用可促进其从初诊断到治疗完成后随访全流程的智能化升级。本文介绍了目前AI技术的概念,探讨其在口腔修复医学的应用与进展,以及现阶段存在的不足与未来发展方向,以期为临床医生与科研人员进一步将口腔医学与人工智能深度融合提供参考。

【关键词】 人工智能; 口腔修复; 数字化技术

基金项目: 广东省自然科学基金(2022A1515012485)

引用著录格式: 戴雨霖,张新春. 人工智能在口腔修复诊疗中的应用与进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2024,18(1):65-69.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.01.011

Artificial intelligence for prosthodontic treatments: Applications and development

Dai Yulin, Zhang Xinchun

Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangdong Provincial Clinical Research Center of Oral Diseases, Guangzhou 510055, China

Corresponding author: Zhang Xinchun, Email: zhxinch@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Digitalization and information technology have been the main theme of Oral Medicine since the 21st century. In particular, the application of artificial intelligence technology in Prosthodontics can promote the intelligent upgrading of the entire process from the initial diagnosis to the follow-ups after treatment. This article introduced the concept of the current artificial intelligence technologies, discussed the application and progress of artificial intelligence in Prosthodontics, as well as the existing deficiencies at the current stage and the future development directions, so as to provide references for clinical dentists and scientific researchers to further integrate Oral Medicine with artificial intelligence.

【Key words】 Artificial intelligence; Oral restoration; Digital technology

Fund program: Natural Science Foundation of Guangdong

Province (2022A1515012485)

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2024.01.011

数字化技术正在改变口腔医学的诊疗模式,为人工智能(artificial intelligence, AI)在口腔修复领域的应用奠定了基础。作为一项成功范例,计算机辅助设计与制作(computer-aided design and manufacturing, CAD/CAM)自20世纪80年代以来用于定制个性化且精度美观的修复体,现已广泛应用于临床,为口腔医疗提供了更高效、精准和便捷的解决方案。随着云计算、大数据和计算机技术的发展,AI成为国内外研究的热点^[1]。AI可以通过机器学习和深度学习等方法,在临床数据采集的基础上,构建出能够模拟和扩展人类智能的数学模型,从而赋予计算机感知、理解、推理和决策等能力,完成需要人类智慧才能解决的复杂任务。当前,AI已应用于口腔修复的各个环节,包括检查、诊断、方案设计、修复体制作、手术和预后评估等环节,旨在为医师提供智能辅助,提高诊疗的效率、精度和效果,实现以患者为中心的临床模式^[2]。本文介绍AI技术的概念,探讨其在口腔修复的应用、问题与发展方向,以期AI与口腔修复诊疗的深度融合与创新提供发展提供参考。

一、人工智能的概念与原理

AI是利用算法分析数据,设计出可以模拟人类思维的自动化软件程序。机器学习是一种让程序能够从数据中自动学习和优化模型的技术,深度学习作为机器学习的一个分支,使用多层神经网络对数据进行端到端的训练,可以自动学习数据中的高级特征,在处理图像、文本和语音等高维数据方面具有独特优势。用于口腔修复诊疗的AI相关概念见表1。

二、人工智能在口腔修复诊疗中的应用

1. 疾病诊断、方案设计与疗效预测:在口腔修复中,诊断结果为方案设计提供依据,也是疗效预测的基础;方案设计的科学性决定了疗效预测的准确性,疗效预测结果可反馈规范诊疗方案,因此三者通过信息共享实现互相优化,是相互依存、互为因果的循环系统。

口腔修复是一门综合性学科,其诊断范围涵盖牙体缺损、牙列缺损、牙列缺失、牙周病和颞下颌关节紊乱等多种口腔疾病,旨在为不同情况制定全面的诊疗计划。目前,AI主要利用深度学习模型和计算机视觉技术分析各类口腔影像数

表1 用于口腔修复诊疗的人工智能技术的相关概念

技术名称	定义
机器学习(machine learning, ML) ^[3]	通过训练算法分析口腔医学数据,发现诊断和治疗规律,辅助制定个性化的口腔修复方案
专家系统(expert system, ES) ^[4]	利用口腔医学知识库,模拟专家进行推理,可以诊断口腔疾病、制定治疗计划和分析复杂口腔案例
自然语言处理(natural language processing, NLP) ^[5]	分析患者口腔症状的语言描述,进行标准化处理,识别症状关键信息,实现患者与系统的交互
深度学习(deep learning, DL) ^[6]	利用神经网络分析口腔医学图像,实现口腔病变的自动检测和智能诊断
混合现实(mixed reality, MR) ^[7]	将虚拟现实(virtual reality, VR)和增强现实(augmented reality, AR)结合,采集口腔三维数据,生成虚拟口腔环境,辅助口腔修复治疗规划

据^[5,8-9],或组织活检、生物标志物和荧光图像等检查结果^[10-12],在图像去噪等预处理和提取解剖结构的基础上,构建口腔三维数字模型和目标问题的特征向量;并通过特征与临床表现的关联规则学习,实现对常见或临床难以确诊疾病的快速准确诊断。此外,传统机器学习技术如决策树、粗糙集和逻辑回归等也可用于自动识别、分割天然牙、修复体和口颌面解剖结构等^[13]。

AI可综合分析诊断结果和患者个性化需求,选择合适的修复方式和材料,评估其优劣、风险和预后,以提高口腔修复质量和成功率。Lee等^[3]将2359颗牙齿的临床数据和17个关键参数作为训练数据集,以3位经验丰富的修复医师判断作为评估标准,发现决策树和其他机器学习分类模型可以进行风险预测并获得较高的准确度。Aliaga等^[14]采用基于案例的推理系统(case-based reasoning system, CRS)预测复合树脂和汞合金修复材料治疗的寿命,其平均绝对误差分别为0.42和0.21年。总体来说,统计模型和递归神经网络常用于手术风险预测;深度学习和回归模型治疗效果评估;基于案例和模糊推理用于临床决策支持系统(clinical decision support system, CDSS)。此外,AI可通过强化学习模型的反复仿真训练来优化治疗方案。

基于深度学习的口腔病变智能诊断、多源信息的精准评估、强化学习的个性化治疗及知识图谱的差异化诊断等都是研究热点。但也存在数据质量较差、数据集不足和模型复杂度不匹配等问题。为解决这些问题,有学者采用基于生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)的模型消除口腔金属修复材料引起的伪影,提高口腔影像的诊断质量^[15]。使用非医疗领域的的数据训练神经网络,并通过预训练权重初始化提升模型在口腔医学中的迁移效果以解决数据集不足的问题^[16-17]。对于模型复杂度的匹配情况, Schneider等^[17]建议根据资源和训练时间的具体情况灵活选择合适复杂度的模型,以适应不同的应用场景。此外, Alsomali等^[18]发现使用多角度的口腔图像可提高AI定位牙齿标志物的精确度。

2. 修复体设计:修复体的设计包括比色、自动化固定或活动义齿的设计、使用活动义齿患者的面部变化的预测。

多项实验表明, AI模型的比色能力总体优于直接视觉评估,但在部分无牙颌或颜色和结构复杂的病例中,其准确度会降低^[19]。尽管CAD/CAM技术可提高修复体设计流程的效率,但对于个体患者的定制能力欠缺。2D对抗生成网络

(2D-generative adversarial networks, 2D-GAN)^[20]和3D深度卷积对抗网络(3D-deep convolutional generative adversarial networks, 3D-DCGAN)^[21]模型可直接利用或间接生成三维(three-dimensional, 3D)数据,模拟技师设计出与天然牙相似的冠。对于活动义齿,基于知识的专家系统可用于修复体设计并取得良好的效果,但存在数据不足、模型泛化能力有限等问题^[22-23]。基于机器学习的算法可用于牙弓分类^[24]和无牙颌患者的面部外观预测^[25],辅助活动义齿的设计。总体而言,固定义齿的设计需考量牙齿的形态、颜色、接触关系和咬合关系等因素;活动义齿则需关注义齿的稳定性、固位力和生物相容性等因素。对复杂情况,医生需要综合运用遗传算法、模糊逻辑和专家系统等技术进行多方案比较,寻找最佳或近似最佳的解决方案。

在种植修复方面, AI可以通过分割口内扫描或锥形束计算机断层影像数据构建术区的三维情况^[26],提高种植手术的效率 and 精确度。研究发现,通过根尖X线片和口腔全景曲面体层片训练的种植体AI模型总体准确率达93.8%~98%^[27]。然后, AI可以结合有限元分析和机器学习优化种植体的设计,调整种植体的孔隙度、长度和直径等参数以减小种植体-骨界面的应力^[28],提高种植体的稳定性和生物相容性,延长种植体的使用寿命。接着,可以根据患者的疾病风险因素,如骨量、骨密度,预测种植体的成功率,并设计个性化种植体植入位点^[27,29],辅助医生和患者选择最合适的种植方案,提高种植成功率。此外,虚拟现实技术可以通过外接设备和传感器模拟外界环境,实时显示患者的口腔解剖结构和种植路径,与临床医生进行可视化交互,从而提高手术的精度和安全性^[30];还可以使患者在术前直观了解手术过程,预览术后效果,对和谐的医患沟通具有重要意义^[31]。

3. 修复体制作:CAD/CAM或3D打印技术与AI相结合,可以实现口腔修复体制作的智能化、精细化、个性化和质量控制。具体而言, AI可通过视觉系统识别修复体的形状,同时可通过传感器和算法实时监测环境温度、激光功率和刀具磨损程度等参数,实现制作过程的质量控制^[32]。AI还可以运用专家系统训练模型,根据铸造参数和材料特性设计制作方案,进行成本预测、材料性能评估和选材推荐,提高铸件的利用率和质量^[33]。例如, Li等^[34]利用机器学习模型预测CAD/CAM树脂材料块的抗弯强度及其影响因素。3D打印技术如立体光刻(stereolithography appearance, SLA)可用于

种植导板的制作,其中AI可以预测不同制造参数对打印质量的影响^[35],或使用传感器实时评估修复体的打印质量^[36]。

4. 机器人技术:机器人技术是由AI、机器学习、传感器和数据处理等多种高新技术结合而成的一个复杂的智能系统,其理论基础包括数学模型(用于描述机器人的形状、方向和运动)、运动轨迹规划(根据数学模型计算机器人的运动轨迹)和控制策略(如力反馈控制等)。口腔种植机器人技术的发展相对成熟,是口腔修复治疗向智能、精准和微创发展的重要推动力。它主要包括两种类型:机器人辅助种植技术(computer-assisted implant surgery)和自主种植手术(autonomous implant surgery, AIS)。前者是外科医生操作时使用机械臂或触觉反馈设备作为辅助,根据术前计划引导操作,同时医生可做出自主决策和调整^[37]。后者基于CT数据和虚拟计划,在无人工干预的情况下进行种植体的定位和放置^[38-39]。这两种技术都可以提高传统种植的精度和效率,但也存在成本高、学习曲线长和设置时间长等技术局限。

大多研究旨在评估不同机器人系统的准确性、安全性、可行性和种植效果^[40]。这项技术已经广泛应用于单牙^[38]、无牙颌^[41]、即刻种植^[39]和颧骨种植^[42]等多项手术,并可获得优于传统方法和静态或动态导航的治疗精度^[39]。例如,全自动单牙种植可控制总角度偏差在15°内,垂直顶点平均偏差为0.09 mm^[39],并且采用锁定结构可显著减小多项偏差^[37]。混合现实技术与导航系统结合,可实现医师在虚拟和真实环境的无缝过渡,从而提升手术的精准度和安全性;还可增强视觉和触觉反馈,缩短手术时间,优化预后^[43]。然而,口腔种植机器人技术尚且缺乏统一的技术标准和行业规范,导致产品间不兼容,影响推广应用。同时,安全性和可靠性保障措施不完善,存在故障风险和意外可能。此外,人际交互的协调性有待提高。

多项研究表明,相较于传统手工方式,针对全冠、桥体和活动义齿等各类牙体预备,数字化预备技术可实现更高的精确度。LaserBot 微型机器人利用飞秒激光束实现3D运动的精确控制,可直接放置在牙齿上完成预备。机器人技术可与数控切削系统^[44]或激光^[45]结合使用。Yuan等^[46]采用六自由度机械臂灵活引导低热超短脉冲激光进行预备,并设计了固定装置连接机器人和目标牙齿,保护邻牙免受损伤。临床试验表明,机器人预备天然牙的平均形状误差为(0.097 ± 0.022) mm,预备时间为(17.0 ± 1.8) min^[45]。此外,AI可准确识别预备完成的牙齿的终止线,确保修复体与基牙基台的高度吻合^[47]。总之,备牙机器人可实现精细的自动化操作,减轻人工作业强度,但其定位精度和环境识别仍需提高。同时还需要充分的临床试验和大量的资金投入以推动研发并确保其安全性。高灵敏度传感器和多源异构信息的辅助定位仍是未来研究的方向。

基于虚拟现实技术的数字化验架^[48]和能记录下颌位置与颌位关系^[49]的3D数字技术的成功应用,促进了排牙机器人的发展。排牙机器人使用三维交互式软件进行预排牙,根据患者的口腔数据生成个性化牙弓曲线,随后将设计转化为

机械手的运动指令,用机械手调整人工牙的位置和形状,最后倒入蜡模获得稳定牙列。目前,全口义齿排牙方面的研究还比较少,Zhang等^[50]提出采用微型笛卡尔坐标系和控制点优化的数学函数,实现牙弓发生器的运动规划和同步控制。

5. 修复体寿命预测和治疗后随访:可收集患者的口腔数据、修复体参数和使用情况等信息,建立预测模型,利用机器学习算法分析多因素对修复体寿命的影响,实现个性化预测^[6,14]。对于治疗后随访,还可利用互联网、移动设备和传感器等技术,实现医生和患者之间跨时空的沟通和交互,提高口腔远程医疗或随访的可及性和便利性^[51]。

三、进展与展望

随着口腔医学大数据的蓬勃发展,AI技术在口腔修复诊疗各阶段的应用日趋广泛,包括疾病诊断、治疗计划制定、辅助手术和治疗预测等多方面。我国已经实现了口腔种植机器人的研发,并出台政策支持AI技术向临床转化^[40,52]。当前,AI在口腔医学领域的应用场景集中在医学图像分析、辅助诊断和修复体设计,其他应用还面临数据质量差、模型泛化能力不足等挑战。采用联邦学习等技术可以在保护患者隐私的前提下,集成多个临床中心的数据进行模型训练,提高诊断的准确性^[53]。但同时需警惕AI在高置信度情况下仍存在不确定性的风险^[54]。最后,医师对数字化技术认知水平的差异和机器人技术的低普及率,制约了AI在口腔治疗中的推广^[55]。

目前,AI还处于相对较弱的阶段,只能作为临床决策的辅助工具,需要人类专家进行综合判断^[56]。因此,当前时期需要引导社会对AI技术形成客观理性的认识,避免对其过度信任或无端质疑。未来,AI技术需要继续提升其可解释性、泛化能力和多学科融合度,以实现复杂口腔问题的精确诊治,真正惠及广大患者。同时,还需进一步健全伦理规范与法律监管体系,推动AI这项新技术在监管框架下绿色、健康和可持续地发展。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 胡敏. 口腔医学领域人工智能及相关技术的研究和应用进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(6): 505-513. DOI: 10.3760/cma.j.cn112144-20230505-00183.
- [2] 刘洪臣, 张戎. 人工智能在口腔医学中的应用进展[J]. 中华医学信息导报, 2020, 35(18): 12. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1000-8039.2020.18.114.
- [3] Lee SJ, Chung D, Asano A, et al. Diagnosis of tooth prognosis using artificial intelligence [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(6): 1422. DOI: 10.3390/diagnostics12061422.
- [4] Mayta - Tovalino F, Munive - Degregori A, Luza S, et al. Applications and perspectives of artificial intelligence, machine learning and "dentronics" in dentistry: A literature review [J]. *J Int Soc Prev Community Dent*, 2023, 13(1): 1-8. DOI: 10.4103/jisped.JISPCD_35_22.
- [5] Mohammad - Rahimi H, Motamedian SR, Rohban MH, et al.

- Deep learning for caries detection: A systematic review [J]. *J Dent*, 2022, 122: 104115. DOI: 10.1016/j.jdent.2022.104115.
- [6] Yamaguchi S, Lee C, Karaer O, et al. Predicting the debonding of CAD/CAM composite resin crowns with AI [J]. *J Dent Res*, 2019, 98(11): 1234-1238. DOI: 10.1177/0022034519867641.
- [7] Pethani F, Dunn AG. Natural language processing for clinical notes in dentistry: A systematic review [J]. *J Biomed Inform*, 2023, 138: 104282. DOI: 10.1016/j.jbi.2023.104282.
- [8] 林慧平, 徐婷, 林军. 人工智能在口腔癌和口腔潜在恶性疾病诊断中的研究进展 [J]. *国际口腔医学杂志*, 2023, 50(2): 138-145. DOI: 10.7518/gjkq.2023019.
- [9] Thurzo A, Urbanová W, Novák B, et al. Where is the artificial intelligence applied in dentistry? Systematic review and literature analysis [J]. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(7): 1269. DOI: 10.3390/healthcare10071269.
- [10] Sarode SC, Sharma NK, Sarode G. A critical appraisal on cancer prognosis and artificial intelligence [J]. *Future Oncol*, 2022, 18(13): 1531-1534. DOI: 10.2217/fon-2021-1528.
- [11] Hegde S, Ajila V, Zhu W, et al. Artificial intelligence in early diagnosis and prevention of oral cancer [J]. *Asia Pac J Oncol Nurs*, 2022, 9(12): 100133. DOI: 10.1016/j.apjon.2022.100133.
- [12] Patil S, Albogami S, Hosmani J, et al. Artificial Intelligence in the diagnosis of oral diseases: Applications and pitfalls [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(5): 1029. DOI: 10.3390/diagnostics12051029.
- [13] Li S, Liu J, Zhou Z, et al. Artificial intelligence for caries and periapical periodontitis detection [J]. *J Dent*, 2022, 122: 104107. DOI: 10.1016/j.jdent.2022.104107.
- [14] Aliaga IJ, Vera V, de Paz JF, et al. Modelling the longevity of dental restorations by means of a CBR system [J]. *Biomed Res Int*, 2015: 540306. DOI: 10.1155/2015/540306.
- [15] 曾维, 周善洛, 郭际香, 等. 基于深度学习的口腔颌面部CT图像金属伪影消除与临床验证 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2023, 58(6): 540-546. DOI: 10.3760/ema.j.cn112144-20230302-00067.
- [16] Patcas R, Bornstein M, Schätzle M, et al. Artificial intelligence in medico-dental diagnostics of the face: A narrative review of opportunities and challenges [J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26(12): 6871-6879. DOI: 10.1007/s00784-022-04724-2.
- [17] Schneider L, Arsiwala-Scheppach L, Krois J, et al. Benchmarking deep learning models for tooth structure segmentation [J]. *J Dent Res*, 2022, 101(11): 1343-1349. DOI: 10.1177/00220345221100169.
- [18] Alsomali M, Alghamdi S, Alotaibi S, et al. Development of a deep learning model for automatic localization of radiographic markers of proposed dental implant site locations [J]. *Saudi Dent J*, 2022, 34(3): 220-225. DOI: 10.1016/j.sdentj.2022.01.002.
- [19] Wei J, Peng M, Li Q, et al. Evaluation of a Novel computer color matching system based on the improved back-propagation neural network model [J]. *J Prosthodont*, 2018, 27(8): 775-783. DOI: 10.1111/jopr.12561.
- [20] Tian S, Wang M, Dai N, et al. DCPR-GAN: Dental crown prosthesis restoration using two-stage generative adversarial networks [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2021, 26(1): 151-160. DOI: 10.1109/JBHI.2021.3119394.
- [21] Ding H, Cui Z, Maghami E, et al. Morphology and mechanical performance of dental crown designed by 3D-DCGAN [J]. *Dent Mater*, 2023, 39(3): 320-332. DOI: 10.1016/j.dental.2023.02.001.
- [22] Zhang J, Xia J, Li J, et al. Reconstruction-based digital dental occlusion of the partially edentulous dentition [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2017, 21(1): 201-210. DOI: 10.1109/JBHI.2015.2500191.
- [23] Chen Q, Lin S, Wu J, et al. Automatic drawing of customized removable partial denture diagrams based on textual design for the clinical decision support system [J]. *J Oral Sci*, 2020, 62(2): 236-238. DOI: 10.2334/josnusd.19-0138.
- [24] Takahashi T, Nozaki K, Gonda T, et al. A system for designing removable partial dentures using artificial intelligence. Part 1. Classification of partially edentulous arches using a convolutional neural network [J]. *J Prosthodont Res*, 2021, 65(1): 115-118. DOI: 10.2186/jpr.JPOR_2019_354.
- [25] Yuan F, Cheng C, Dai N, et al. Prediction of aesthetic reconstruction effects in edentulous patients [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 18077. DOI: 10.1038/s41598-017-17065-y.
- [26] Kurt Bayrakdar S, Orhan K, Bayrakdar IS, et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images [J]. *BMC Med Imaging*, 2021, 21(1): 86. DOI: 10.1186/s12880-021-00618-z.
- [27] Mangano FG, Admakin O, Lerner H, et al. Artificial intelligence and augmented reality for guided implant surgery planning: A proof of concept [J]. *J Dent*, 2023, 133: 104485. DOI: 10.1016/j.jdent.2023.104485.
- [28] Revilla-León M, Gómez-Polo M, Vyas S, et al. Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review [J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 129(2): 293-300. DOI: 10.1016/j.prosdent.2021.05.008.
- [29] Sakai T, Li H, Shimada T, et al. Development of artificial intelligence model for supporting implant drilling protocol decision making [J]. *J Prosthodont Res*, 2023, 67(3): 360-365. DOI: 10.2186/jpr.JPR_D_22_00053.
- [30] 周勇, 张思慧, 赵晓娟, 等. 口腔种植治疗培训中虚拟现实技术的应用及评价 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2021, 56(8): 799-804. DOI: 10.3760/ema.j.cn112144-20201210-00608.
- [31] 刘琳, 李鸿波, 刘洪臣. 混合现实技术在口腔医学中的应用展望 [J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2019, 20(2): 102-107. DOI: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2019.02.009.
- [32] Ochandiano S, García-Mato D, Gonzalez-Alvarez A, et al. Computer-assisted dental implant placement following free flap reconstruction: Virtual planning, CAD/CAM templates, dynamic navigation and augmented reality [J]. *Front Oncol*, 2022, 11: 754943. DOI: 10.3389/fonc.2021.754943.
- [33] Matin I, Hadzistevic M, Vukelic D, et al. Development of an

- expert system for the simulation model for casting metal substructure of a metal - ceramic crown design [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2017, 146: 27 - 35. DOI: 10.1016/j.cmpb.2017.05.004.
- [34] Li H, Sakai T, Tanaka A, et al. Interpretable AI explores effective components of CAD/CAM resin composites [J]. *J Dent Res*, 2022, 101 (11) : 1363 - 1371. DOI: 10.1177/00220345221089251.
- [35] Mahmood MA, Visan AI, Ristoscu C, et al. Artificial neural network algorithms for 3D printing[J]. *Materials (Basel)*, 2020, 14(1):163. DOI:10.3390/ma14010163.
- [36] Kim R, Abisado M, Villaverde J, et al. A survey of image-based fault monitoring in additive manufacturing: Recent developments and future directions[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23 (15) :6821. DOI:10.3390/s23156821.
- [37] Qiao SC, Wu XY, Shi JY, 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. DOI: 10.1111/clr.14112.
- [38] 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. DOI:10.1016/j.jdent.2023.104451.
- [39] Chen J, Zhuang M, Tao B, et al. Accuracy of immediate dental implant placement with task - autonomous robotic system and navigation system: An *in vitro* study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2023. DOI:10.1111/clr.14104.
- [40] 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. DOI: 10.3760/cma.j.cn112144-20210107-00008.
- [41] Bolding S, Reebye U. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches [J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(4) :639-647. DOI:10.1016/j.prosdent.2020.12.048.
- [42] Li C, Wang M, Deng H, et al. Autonomous robotic surgery for zygomatic implant placement and immediately loaded implant-supported full-arch prosthesis: A preliminary research [J]. *Int J Implant Dent*, 2023, 9(1) :12. DOI:10.1186/s40729-023-00474-2.
- [43] Wang J, Shen Y, Yang S. A practical marker - less image registration method for augmented reality oral and maxillofacial surgery [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2019, 14(5) :763-773. DOI:10.1007/s11548-019-01921-5.
- [44] 李忠义,白鹤飞,王勇,等. 牙体预备定量引导技术的研究现状 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2018, 53(2) :137-140. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2018.02.016.
- [45] 原福松,王勇,张耀鹏,等. 口腔临床微机器人自动化牙体预备系统中全冠预备适宜参数初探[J]. *中华口腔医学杂志*, 2017, 52(5) : 270 - 273. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1002 - 0098.2017.05.002.
- [46] Yuan F, Wang Y, Zhang Y, et al. An automatic tooth preparation technique: A preliminary study [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 25281. DOI:10.1038/srep25281.
- [47] Lerner H, Mouhyi J, Admakin O, et al. Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: A retrospective study of 106 implant - supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients [J]. *BMC Oral Health*, 2020, 20(1) : 80. DOI:10.1186/s12903-020-1062-4.
- [48] 黄亚婷,左恩俊. 基于虚拟现实技术在口腔修复中应用的数字化架架 [J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(22) : 3594 - 3601. DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.2277.
- [49] Usui T, Maki K, Toki Y, et al. Measurement of mechanical strain on mandibular surface with mastication robot: Influence of muscle loading direction and magnitude [J]. *Orthod Craniofacial Res*, 2003, 6 (Suppl 1) : 163 - 167. DOI: 10.1034/j.1600 - 0544.2003.250.x.
- [50] Zhang YD, Gu JT, Jiang JG, et al. Motion control point optimization of dental arch generator [J]. *Int J U - E - Serv Sci Technol*, 2013, 6(5) : 49 - 56. DOI: 10.14257/ijunesst.2013.6.5.05.
- [51] Batra P, Tagra H, Katyal S. Artificial intelligence in teledentistry [J]. *Discoveries (Craiova)*, 2022, 10(3) : 153. DOI: 10.15190/d.2022.12.
- [52] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知 [EB/OL]. (2015-05-19) [2022-08-29]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [53] Mohammad-Rahimi H, Motamedian SR, Pirayesh Z, et al. Deep learning in periodontology and oral implantology: A scoping review [J]. *J Periodontal Res*, 2022, 57(5) :942-951. DOI: 10.1111/jre.13037.
- [54] Schneider L, Rischke R, Krois J, et al. Federated vs local vs central deep learning of tooth segmentation on panoramic radiographs [J]. *J Dent*, 2023, 135: 104556. DOI: 10.1016/j.jdent.2023.104556.
- [55] Kumar P, Ravindranath K, Srilatha V, et al. Analysis of advances in research trends in robotic and digital dentistry: An original research [J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2022, 14(Suppl 1) : S185-S187. DOI:10.4103/jpbs.jpbs_59_22.
- [56] 于海洋,张呐,贺子敬,等. 弱人工智能数字化时代下的医技关系 [J]. *口腔医学*, 2023, 43(7) :577-583. DOI: 10.13591/j.cnki.kqyx.2023.07.001.

(收稿日期:2023-06-08)

(本文编辑:王嫒)