

数字化和人工智能在儿童口腔领域的应用进展

惠婷¹, 张广灿²

(山东大学齐鲁医学院口腔医学院·口腔医院/山东省口腔疾病重点实验室/

口腔生物材料与组织再生山东省工程研究中心/山东省口腔疾病临床医学研究中心 1.康虹门诊部; 2.修复科, 山东 济南 250012)

摘要:数字化和人工智能是计算机学科领域的重要分支,它们在口腔医学领域的应用越来越广泛。儿童口腔医学涉及多学科,不同年龄段儿童口腔情况多变,且儿童对于口腔疾病治疗的配合程度相对较低,这为临床工作增加了难度。数字化和人工智能技术正逐步渗透于儿童口腔医学领域,在儿童口腔影像方面,深度学习模型可用于牙龄评估、牙齿数目异常、位置异常的检测。在儿童口腔疾病方面,人工智能可辅助龋病的筛查与检测、青少年牙颌面畸形的诊断以及矫治方案的设计,并可强化儿童口腔行为管理、评估儿童口腔健康状况。其在确保治疗效果的同时,为儿童提供了舒适化、个性化且极具人文关怀的治疗方案,对提高诊疗效率具有重要的临床意义。

关键词:数字化;人工智能;儿童口腔

中图分类号:R788 **文献标志码:**A

Progress in applying digitalization and artificial intelligence to pediatric dentistry

HUI Ting¹, ZHANG Guangcan²

(1. kanghong Clinic; 2. Department of Prosthodontics, School and Hospital of Stomatology, Cheeloo College of Medicine, Shandong University/Shandong Key Laboratory of Oral Diseqses/Shandong Engineering Research Center of Dental Materials and Oral Tissue Regeneration/Shandong Provincial Clinical Research Center for Oral Diseases, Jinan 250012, Shandong, China)

Abstract: Digitalization and artificial intelligence are two important branches of computer science. In recent years, their applications in the field of dentistry have become increasingly widespread due to the rapid development of information technology. Pediatric dentistry involves multiple disciplines and there are varying oral conditions among children of different ages. Furthermore, children's cooperation in oral disease treatment is relatively low, which makes clinical work more difficult. Digitalization and artificial intelligence technologies are gradually becoming established in the field of pediatric dentistry. In pediatric dental imaging, deep learning models can be used to assess dental age and detect abnormalities in the number and position of teeth. With regard to pediatric dental diseases, artificial intelligence can help with the screening and detection of tooth decay, the diagnosis of maxillofacial deformities in adolescents, and the design of orthodontic treatment plans. AI can also enhance pediatric dental behavior management and assess children's oral health status. While ensuring the effectiveness of treatment, it provides children with comfortable, personalized, and highly humane treatment plans, which is of great clinical importance in improving the efficiency of diagnosis and treatment.

Key words: Digitalization; Artificial intelligence; Pediatric dentistry

数字化技术和人工智能(artificial intelligence, AI)是计算机科学的重要分支。数字化技术即计算机辅助技术,是一种通过将各种物质形态的信息转

化为数字信号,经过编码、处理、存储与传输,以数字化的形式呈现出来。人工智能是在电子计算机技术的基础上迅速发展起来的科学技术,是研究开发用

于模拟、延伸和扩展人类智能的理论、方法、技术及应用的一门新兴学科^[1]。其子领域及分支包括机器学习(machine learning, ML)、深度学习(deep learning, DL)、卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)等。ML能够从大量数据中自己学习规律,并利用未知数据进行预测^[2]。DL模型具有多个隐藏层神经网络模型,能够自动发现数据中的复杂模式,对复杂特征进行分类及预测,在图像识别上展现出较好的效果^[3]。CNN作为深度学习中最重要神经网络结构,通过卷积操作提取输入数据中的特征,再通过多层神经网络进行高级特征的学习和分类^[3]。ANN是一种数学模型,其理论基础源于对生物神经网络原理和网络拓扑知识的理解和抽象,具有较强的自我学习和处理非线性关系的能力^[4]。通过设计、组装并连接人工神经元,调整内部节点之间相互连接关系,达到处理信息的目的。在口腔疾病诊断、口腔诊疗计划的制定、诊疗过程中的辅助,以及术后的辅助康复等各个方面,数字化和人工智能都发挥着重要的作用,且其应用日益广泛。它们也正逐步渗透于儿童口腔医学领域,DL、CNN模型可用于儿童牙龄评估、牙齿数目异常、位置异常的检测,ML和DL等可辅助龋病的筛查与检测,并可辅助青少年牙颌面畸形的诊断、矫治方案的设计以及预后评估。虚拟现实技术等可强化儿童口腔行为管理,ML和DL还可辅助进行儿童口腔健康状况的监测与评估等。其在确保治疗效果的同时,为儿童提供了舒适化、个性化且极具人文关怀的治疗方案。本文旨在分析儿童口腔医学领域数字化和人工智能研究的现状和发展趋势,探究该研究范畴的热点和前沿,以期为广大医务工作者掌握该领域的动态和定位热点研究方向提供参考。

1 AI在儿童口腔影像检查中的应用

儿童口腔医学涉及多学科交叉融合,常见疾病种类较多,如龋病、牙髓根尖周病、牙齿数目异常、牙齿发育异常等。这些疾病的诊断通常需借助影像学检查,如根尖片、曲面断层片、锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)等。近年来人工智能在儿童口腔影像中的研究数量逐渐增加,曲面断层片是最常用的研究材料^[5]。曾雪晴等^[6]的问卷调查结果显示中国口腔医生对AI辅助判读儿童曲面断层片的需求程度较高,对AI未来的发展具备信心,同时也有少部分医生担忧未来被

AI取代。

1.1 牙龄的评估

牙龄是判断儿童生长发育的重要生物学指标之一。通过牙齿的发育情况,医师能够评估儿童的生长发育状态,对于正畸患者牙龄评估可以帮助制订治疗计划。牙龄评估在法医学中可以用来确定无名遗体或生前未知身份人士的年龄,传统的牙龄评估方法复杂,需要详细分析牙齿的发育形态和钙化情况,使用的参考数据集相对滞后固化,导致对不同群体的评估误差较大。Zaborowicz等^[7]使用4~15岁患儿的曲面断层片建立数据集,并基于计算机图像分析、卷积神经网络、径向基函数网络的三个非线性模型,得出了一套评估实际年龄所需的原始指标,准确度达96%~99%。并在后期研究中建立深度学习模型,能够更快速、准确获得结果,平均绝对误差为2.34~4.61个月^[8]。You Only Look Once(YOLO)神经网络模型为单阶段检测器,具有轻量化的网络结构优势,能对多个目标同时进行空间位置预测与分类任务,且能很好地利用一张图的整体信息快速地提供图像分析结果^[9]。石宇超等^[10]利用深度学习方法,通过分析曲面断层片,建立了一套覆盖恒牙所有发育阶段牙龄的自动评估方法,通过YOLO v3网络进行牙齿定位和识别,达到了97.50%平均精度,以SOS-Net(对称融合和有序回归的分级)方法实现牙齿发育成熟度分期,准确率达到82.97%,利用参考数据集进行牙龄换算,全牙列评估的平均绝对误差为0.72年。AI技术为医生提供了一种快速、标准化的牙龄评估方法,有效降低了传统牙龄研究繁琐、耗时的弊端,可强力推进其从理论到实践上的突破。

1.2 乳恒牙及牙齿数目异常的检测

儿童口腔医师门诊患者较多,辨别恒牙胚、识别是否存在额外牙和先天缺牙是口腔医生的关注重点和难点之一。为提高诊疗效率,减少漏诊与误诊,口腔医师更希望实现乳恒牙、额外牙及缺失牙的智能识别。鉴于深度学习在医学图像识别中的突出优势,Kilic等^[11]基于Faster R-CNN Inception v2检测5~7岁儿童曲面体层片的乳牙及牙位,精确率为95.7%。Kaya等^[12]采用YOLO v4神经网络模型对5~13岁儿童曲面体层片进行乳牙及恒牙的检测与编号模型训练,获得了较高的精确率与召回率。Ahn^[13]、Ha^[14]、Kim等^[15]利用深度学习模型对上颌前牙区额外牙进行智能识别与分类。但前述这些研究不能同时检测出乳恒牙、恒牙胚和额外牙,无法识别出非正中位置的额外牙,也无法检测出先天缺牙

的表现。国内一项研究^[16]开发了基于深度学习的儿童曲面断层片牙齿数目异常识别模型,其能在识别正常乳恒牙及恒牙胚的基础上,确定全口额外牙的数目和位置,并输出缺失恒牙的牙位,从而辅助诊断有无牙齿数目异常。

1.3 牙齿异位萌出

牙齿异位萌出是指恒牙在萌出过程中未在牙列的正常位置萌出。以上颌第一恒磨牙异位萌出最为常见,会导致相邻乳第二磨牙过早脱落、前磨牙阻生以及牙弓长度缩短。在自动医学图像分割领域,基于U型网络(U-Net)的医学图像分割自适应框架无新网络(no-new-Net, nnU-Net)^[17],凭借其出色的性能表现以及强大的自适应性,在众多任务中得到了广泛应用。Zhu等^[18]利用nnU-Net模型,将285张儿童曲面断层片制作成数据集,提出一种能够在全景片上自动分割和检测混合牙列中第一恒磨牙异位萌出的AI模型。Liu等^[19]使用1480张4~9岁患者的全景片训练自动筛查模型,基于卷积神经网络建立了上颌第一恒磨牙异位萌出自动识别模型,其敏感性和特异性均高于三位经验丰富的儿童牙医手动检测的结果,这些研究有望应用于上颌第一恒磨牙异位萌出的大规模筛查。

训练数据的构成对于医学影像智能模型的开发至关重要。目前尚无公开的儿童曲面断层片数据库,前期的这些研究数据主要是针对特定地区或医院的数据库,并不能完全覆盖不同地区、不同医院,未来可尝试扩大数据库,并结合根尖片或者CBCT等影像资料,开发其他辅助判读儿童牙齿数目异常、牙齿异位萌出的智能模型。

2 AI在儿童龋病诊断及预防中的应用

第四次全国口腔流行病学调查结果显示,我国3~5岁年龄组患龋率分别为50.8%、63.6%、71.9%,而就诊率不足10%,说明我国儿童患龋率正不断上升,儿童的口腔健康状况不容乐观。由于儿童不配合口腔检查、医生缺乏、家长对儿童龋齿辨识度不够,大部分患儿在发病初期无法确定是否患有龋齿,从而耽误最佳治疗时间。充分利用大数据、人工智能等技术辅助识别龋齿、提高诊断准确率是亟待解决的问题。

Pang等^[20]基于青少年的问卷调查、口腔检查、唾液测试、单核苷酸多态性测序分析数据,使用机器学习算法构建龋齿风险预测模型,实现了对高风险

龋齿患者的预测。Karhade等^[21]开发了一种自动机器学习算法,可根据患儿局部、全身、社会等多种因素筛选龋齿高危患儿。余红兵^[22]发明了一种基于深度学习的儿童第一恒磨牙龋齿筛选方法,该方法将牙齿图像上传到云端,采用深度学习的龋齿智能检测和分析算法,足不出户就能获得龋齿初步诊断结果。李若竹等^[23]建立了对儿童口内照片进行龋齿识别的深度学习模型,其中在未成洞龋的判断上具有较大潜力。李彦甫等^[24]提出了CR-PANET龋齿检测模型,该模型采用PANET的多尺度聚合架构,对手机等移动设备拍摄的口腔图片上的龋病区域进行实时检测,其准确率和召回率达98.9%和89.0%,有望实现患者的龋病自检或辅助医生检测。现有的研究关注的都是已有硬组织缺损破坏的龋坏,还未真正做到龋病的早期诊断,即发现并判断釉质脱矿,这也是未来需要探索的方向。

3 AI在儿童颜面管理中的应用

“儿童颜面管理”是指在儿童生长发育不同阶段,通过合理的医疗干预,实现儿童颜面有序健康发展,使其建立良好的牙颌关系。2021儿童睡眠呼吸暂停低通气综合征(obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome, OSAHS)等手术指南中明确指出:扁桃体、腺样体肥大影响颌面部发育,引起腺样体面容或造成牙列不齐。对于3岁以上并有牙颌面骨性发育畸形或出现该趋势的患儿需及早干预^[25]。已有多项研究表明,基于深度学习的AI诊断模型可通过锥形束CT、MRI图像自动识别儿童腺样体及扁桃体肥大,并具有较高的敏感性和特异性,所需时间仅为人工的1/10^[26-27]。恢复正常鼻呼吸的手术如腺样体、扁桃体切除术、声门狭窄扩大术等,手术机器人是AI运用于临床治疗OSAHS的重要组成部分。

对于存在牙颌面畸形的患儿,正畸方案的制定涉及诸多复杂因素,高度依赖医生的临床经验,一旦决策失误,有可能对患者造成不可逆性损害。Park等^[28]使用基于YOLOv3神经网络模型算法的人工智能,自动识别80个测量标志点的精度与人工识别无明显差异。Knoops等^[29]提出了一种基于面部3D扫描的AI模型,可三维虚拟预测牙齿移动方式、面部变化,有助于术前与患者的沟通。另有研究表明^[30-31],使用AI系统根据影像表现决定正畸前是否需要拔牙,准确率可达92%~96%。但是AI辅助制定拔牙方案,目前研究仅限于常规拔牙模式,即第

一、二前磨牙对称拔除与否。纳入更多的影响因素,如患者主诉、错 $\uparrow$ 类型、非常规拔牙等,能综合提升AI在此领域的性能,更好的服务于正畸临床。三维牙齿分割是指利用计算机算法在数字化牙模中将不同牙冠分离成独立的3D牙齿模型,是正畸数字化拥挤度诊断、排牙方案设计、模拟牙齿移动、矫治器制作的前置步骤。利用深度学习算法辅助三维牙齿分割任务用时仅有数十秒^[32-33],而人类专家需要超过10分钟,这大大提高了临床效率。但也有一定局限性,如对于形态异常复杂或相似的牙齿等分牙能力有限。在三维牙齿分割的基础上,Wu等^[34]使用PointNet在分割出的牙齿上自动识别测量标志点,标志点定位的平均绝对误差为 (0.597 ± 0.761) mm,是可以被接受的。而Ma等^[35]应用CNN对13个常用标志点定位,平均误差高达5.78 mm;此外Lachinov等^[36]应用CNN定位眶下点及耳点,结果表明在4 mm误差范围内,定位准确率达97%,然而在2 mm误差范围内,准确率降至78%。由此可见AI在标志点定位准确率方面无法到达临床要求^[37],这可能是由于一些标志点影像结构不清或无明显图形特征,亦或用于训练的数据集有限。因此现有的AI技术可用于标志点的初步定位,在进行进一步测量分析之前,可能仍需要手动校准。另外数据资料的丰富性仍是AI在儿童及青少年正畸治疗应用中的一大限制因素,有待拓展和完善,以不断提高AI系统的准确度。

4 数字化和AI在儿童口腔行为管理中的应用

牙科恐惧症是口腔治疗中常见的心理障碍性疾病。儿童因其年龄、认知等因素,是牙科恐惧症的高发人群,常导致患儿病情延误,甚至造成严重的心理创伤。将能够管理儿童行为帮助其配合完成口腔疾病治疗的方法称为儿童口腔行为管理^[38]。随着信息技术的发展,数字化技术和人工智能技术主导下的行为管理方法已成为较为前沿的技术,可明显缓解患儿的牙科焦虑、提高合作度,最终促进口腔健康。虚拟现实(virtual reality, VR)技术是由计算机、多媒体、网络等多种技术汇集而成的具有交互性、感知性及沉浸感的前沿技术。它在缓解儿童术前焦虑方面应用极为广泛。VR技术让患儿处于虚拟环境中,其沉浸感会使人的注意力从现实世界中部分“消耗”,从而减轻患儿的恐惧情绪^[39]。国内研究显示VR技术在降低患儿的焦虑心理及疼痛感

知程度上优于告知-演示-操作引导,且VR眼镜受到患儿的高度喜爱^[40]。有报道显示,VR有诱发某些使用者发生运动病-癫痫的理论风险^[41]。因此在临床使用以及未来研究中应更多地关注人格特质的差异。治疗过程中因局部麻醉产生的疼痛也是患儿恐惧的一个主要原因。现在临床上应用较广泛的计算机控制的单颗牙齿麻醉系统(singles tooth anesthesia, STA),由计算机经过精密计算,结合动态压力传感技术,通过AI巡航控制,使麻药传送的流动速度低于患者感受到的疼痛阈值,从而达到无痛麻醉的效果,尤其适用于牙科恐惧症患儿。有研究显示在拔牙前为患儿使用STA进行局部麻醉,可消除患儿对注射针头的恐惧,从而使局部麻醉顺利进行并可达至无痛,口腔治疗操作也更加容易进行^[42]。

提供个性化情绪价值服务是口腔治疗领域重要的趋势之一,这促进了AI技术的发展以满足量身定制的诊疗需求。具有自然语言处理能力的AI聊天机器人能够有效地理解,并对儿童消极情绪做出相应的反馈。作为细心的倾听者,可以参与对话互动,为儿童提供情感支持,从而使经历过牙科恐惧的患儿忘记曾有的看牙恐惧事件,重构为积极记忆^[43]。AI技术还可以有效监测患儿的异常行为,并向父母或监护人提供反馈。例如,AI驱动的系统可以分析患儿在线活动、社交媒体互动或设备使用情况,以识别潜在风险或问题行为的迹象。然后,这些信息可以与父母或监护人共享,以便及时干预和指导^[44-45]。在儿童口腔行为管理中,AI可以在患儿就诊前及时发现其潜在危险行为,为后续的口腔治疗提供优化方案。但是在儿童行为管理方面医生也不能过度依赖数字化和AI,这会损害人际交往和与患儿的共情互动能力,而这两者又是缓解患者儿童牙科恐惧的重要因素,所以如何有效地将数字化和AI应用于临床实践仍面临着巨大挑战。

5 儿童口腔健康的智能化管理

目前人工智能技术在口腔健康保健、预防等领域的应用尚处于起步探索阶段。口腔疾病预防的关键因素为牙菌斑,牙菌斑的识别和控制对儿童的口腔健康极为重要。牙菌斑通常由医生使用探针或菌斑指示剂进行识别,该方法耗时、受人为影响大。游文喆等^[46-47]通过家用口腔内镜收集自然状态下的乳牙及年轻恒牙唇颊侧照片,利用深度学习模型对收集的数据集进行训练,建立了乳牙及恒牙牙菌斑智能判读系统。对于民众而言该系统使用方便,易

于普及,可助力口腔疾病预防,提升民众的口腔健康。对于医生而言,可提高医生工作效率,缩短椅旁宣教时间,缓解口腔医生工作压力。刷牙是清除牙菌斑最有效的方法。针对儿童不爱刷牙、不会刷牙的难题,口腔健康管理品牌欧可林利用大语言模型将 GPT、VIT、NERF 这 3 个模型结合起来,构建了语义、视觉、空间相融合的 AI 算法,研发出了一款儿童 AI 互动牙刷^[48]。在刷前、刷中,以趣味 AI 互动内容以及科学刷牙歌,为刷牙过程持续注入新鲜感,让孩子主动刷牙;在刷后,通过云边计算即时反馈,主动为孩子刷牙的漏刷区域提醒补刷,并在 APP 端通过 AI 主动为家长解读刷牙报告,让刷牙结果和建议一目了然。随着 AI 技术的不断发展,未来将会有更多智能化、个性化的儿童口腔护理产品,为小朋友们提供更加便捷、高效的口腔护理体验。激发孩子兴趣主动愿意刷牙,并且能够指导孩子科学刷牙,这样一定能极大改善中国儿童口腔健康状况。

窝沟是牙齿最容易龋坏的部位。房禹池等^[49]采用深度学习算法结合 U-Net 神经网络和注意力机制实现了对牙齿殆面轮廓和窝沟形态的分类识别,重点解决了龋齿高发部位的预防问题,为儿童龋齿的预防检查提供了一种新思路。窝沟封闭术是预防窝沟龋较为有效的方法,而窝沟封闭剂存在脱落的可能。Schlickerrieder 等^[50]通过卷积神经网络模型检测数码照片上完整、不完整、不存在窝沟封闭剂的后牙,其准确率达到 90% 以上。该方法有望应用于家庭智慧医疗领域。

6 挑战与展望

综上所述,人工智能在儿童口腔领域发挥了重要作用,可助力儿童口腔飞速发展。但是 AI 在儿童口腔领域的应用也面临着许多问题和挑战。儿童属于特殊群体,不同年龄段患儿的心理需求不同,这就要求所开发应用的 AI 模型或软件更人性化、个性化,以充分适应不同发育阶段的个体特点。儿童患者配合度差、解剖发育复杂,且 AI 模型训练数据集多来源于同一单位或机构,当面对不同机构、不同年龄段、不同群体等的数据集时,AI 模型的稳定性会下降,其判断和执行结果可能会出现错误,而 AI 又很难自动终止,则可能将患儿置于危险之中。其次部分 AI 算法,对于用户来说缺乏透明度及可解释性,人工智能需要通过解释来证明特定诊断或治疗过程,因此需开发透明度更高的系统,向医生和家长准确解释其结果。目前 AI 诊断只能针对单一疾

病进行分析,无法对该疾病所有类别进行智能诊断。另外已有研究提示 AI 可能造成数据安全风险,包括健康数据采集过程中可能产生的隐私泄露、数据深挖等,因此未来 AI 应用于儿童健康领域有必要解决隐私权保护问题。故 AI 并不能代替人类,人类在疾病的诊断、分析及治疗规划中仍要发挥主导作用。当然随着科技的发展及相关法律制度的完善,通过合理的设计和长期的临床验证,相信 AI 有望在儿童龋病、牙髓根尖周病、颜面管理、健康评估等方面取得突破性进展。

参考文献:

[1] 刘洪臣. 人工智能口腔医学[J]. 中华口腔医学杂志, 2020, 55(12): 915-919.

[2] Deo R C. Machine learning in medicine[J]. Circulation, 2015, 132(20): 1920-1930.

[3] Choi R Y, Coyner A S, Kalpathy-Cramer J, et al. Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning[J]. Transl Vis Sci Technol, 2020, 9(2): 14. DOI:10.1167/tvst.9.2.14

[4] Lee W H, Lee S, Kim J, et al. Measurement of psoriasis-affected area with artificial neural network[J]. J Am Acad Dermatol, 2023, 88(3): 731-732.

[5] Vishwanathaiah S, Fageeh H N, Khanagar S B, et al. Artificial intelligence its uses and application in pediatric dentistry: a review[J]. Biomedicines, 2023, 11(3): 788. DOI:10.3390/biomedicines11030788

[6] 曾雪晴, 樊华, 夏斌, 等. 口腔医生对人工智能辅助判读儿童曲面断层片的需求调查[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2024, 34(6): 332-336.

Zeng Xueqing, Fan Hua, Xia Bin, et al. The needs of dentists for artificial intelligence models to read pediatric panoramic radiographs[J]. Chinese Journal of Conservative Dentistry, 2024, 34(6): 332-336.

[7] Zaborowicz K, Biedziak B, Olszewska A, et al. Tooth and bone parameters in the assessment of the chronological age of children and adolescents using neural modelling methods[J]. Sensors, 2021, 21(18): 6008. DOI: 10.3390/s21186008

[8] Zaborowicz M, Zaborowicz K, Biedziak B, et al. Deep learning neural modelling as a precise method in the assessment of the chronological age of children and adolescents using tooth and bone parameters[J]. Sensors, 2022, 22(2): 637. DOI:10.3390/s22020637

[9] Warin K, Limprasert W, Suebnukarn S, et al. Assessment of deep convolutional neural network models for mandibular fracture detection in panoramic radiographs

- [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2022, 51(11): 1488-1494.
- [10] 石宇超, 叶泽林, 董文莹, 等. 儿童牙龄智能评估的技术创新与应用[N]. *中国医学论坛报*, 2024-07-30(05-06).
- [11] Kılıc MC, Bayrakdar IS, Çelik Ö, et al. Artificial intelligence system for automatic deciduous tooth detection and numbering in panoramic radiographs[J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2021, 50(6): 20200172. DOI: 10.1259/dmfr.20200172
- [12] Kaya E, Gunec H G, Gokyay S S, et al. Proposing a CNN method for primary and permanent tooth detection and enumeration on pediatric dental radiographs[J]. *J Clin Pediatr Dent*, 2022, 46(4): 293-298.
- [13] Ahn Y, Hwang J J, Jung Y H, et al. Automated mesiodens classification system sing deeplearning on panoramic radiographs of children[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(8): 1477. DOI: 10.3390/diagnostics11081477
- [14] Ha E G, Jeon K J, Kim Y H, et al. Automatic detection of mesiodens on panoramic radiographs using artificial intelligence[J]. *Sci Rep*, 2021, 29, 11(1): 23061. DOI: 10.1038/s41598-021-02571-x
- [15] Kim J, Hwang J J, Jeong T, et al. Deep learning-based identification of mesiodens using automatic maxillary anterior region estimation in panoramic radiography of children[J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2022, 51(7): 20210528. DOI: 10.1259/dmfr.20210528
- [16] 曾雪晴, 夏斌, 曹战强, 等. 基于深度学习的儿童曲面体层 X 线片牙齿数目异常识别模型的研发[J]. *中华口腔医学杂志*, 2023, 58(11): 1138-1144.
- Zeng Xueqing, Xia Bin, Cao Zhanqiang, et al. Identification model of tooth number abnormalities on pediatric panoramic radiographs based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Stomatology*, 2023, 58(11): 1138-1144.
- [17] Isensee F, Jaeger P F, Kohl S A A, et al. nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation[J]. *Nat Methods*, 2021, 18(2): 203-211.
- [18] Zhu H H, Yu H J, Zhang F, et al. Automatic segmentation and detection of ectopic eruption of first permanent molars on panoramic radiographs based on nnU-Net[J]. *Int J Paediatr Dent*, 2022, 32(6): 785-792.
- [19] Liu J, Liu Y, Li S, Ying S, et al. Artificial intelligence-aided detection of ectopic eruption of maxillary first molars based on panoramic radiographs[J]. *J Dent*, 2022, 125: 104239. DOI: 10.1016/j.jdent.2022.104239
- [20] Pang L Y, Wang K T, Tao Y, et al. A new model for caries risk prediction in teenagers using a machine learning algorithm based on environmental and genetic factors[J]. *Front Genet*, 2021, 12: 636867. DOI: 10.3389/fgene.2021.636867
- [21] Karhade D S, Roach J, Shrestha P, et al. An automated machine learning classifier for early childhood caries[J]. *Pediatr Dent*, 2021, 43(3): 191-197
- [22] 余红兵. 一种基于深度学习的儿童六龄牙龋齿智能筛查方法[P]. *中国专利*: CN112151167A.2020.12.29
- [23] 李若竹, 朱俊霞, 王媛媛, 等. 基于深度学习的儿童龋齿人工智能识别系统雏形的开发[J]. *中华口腔医学杂志*, 2021, 56(12): 1253-1260.
- [24] 李彦甫, 兰海月, 薛婧帆, 等. 基于多尺度路径聚合的儿童龋齿检测算法[J]. *中国激光*, 2024, 51(15): 162-172.
- Li Yanfu, Lan Haiyue, Xue Jingfan, et al. Child caries detection algorithm based on multi-scale path aggregation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(15): 162-172.
- [25] 中国医师协会耳鼻咽喉头颈外科医师分会. 儿童扁桃体腺样体低温等离子射频消融术规范化治疗临床实践指南[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2021, 35(3): 193-199.
- [26] Kournoutas I, Vigo V, Chae R, et al. Acquisition of volumetric models of skull base anatomy using endoscopic endonasal approaches: 3D scanning of deep corridors via photogrammetry[J]. *World Neurosurg*, 2019, 129: 372-377. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.05.251
- [27] Zhao T T, Zhou J W, Yan J R, et al. Automated adenoid hypertrophy assessment with lateral cephalometry in children based on artificial intelligence[J]. *Diagnostics*, 2021, 11(8): 1386. DOI: 10.3390/diagnostics11081386
- [28] Park J H, Hwang H W, Moon J H, et al. Automated identification of cephalometric landmarks: Part1-Comparisons between the latest deep-learning methods YOLOV3 and SSD[J]. *Angle Orthod*, 2019, 89(6): 903-909.
- [29] Knoop P G M, Papaioannou A, Borghi A, et al. A machine learning framework for automated diagnosis and computer-assisted planning in plastic and reconstructive surgery[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 13597. DOI: 10.1038/s41598-019-49506-1
- [30] Thanathornwong B. Bayesian-based decision support system for assessing the needs for orthodontic treatment[J]. *Healthc Inform Res*, 2018, 24(1): 22-28.
- [31] Kunz F, Stellzig-Eisenhauer A, Zeman F, et al. Artificial intelligence in orthodontics: evaluation of a fully automated cephalometric analysis using a customized convolutional neural network[J]. *J Orofac Orthop*, 2020, 81(1): 52-68.
- [32] Zanjani F G, Pourtaherian A, Zinger S, et al. Mask-MCNet: tooth instance segmentation in 3D point clouds of intra-oral scans[J]. *Neurocomputing*, 2021, 453: 286-298. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.06.145

- [33] Hao J, Liao W, Zhang Y L, et al. Toward clinically applicable 3-dimensional tooth segmentation via deep learning[J]. *J Dent Res*, 2022, 101(3): 304-311.
- [34] Wu T H, Lian C F, Lee S, et al. Two-stage mesh deep learning for automated tooth segmentation and landmark localization on 3D intraoral scans[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2022, 41(11): 3158-3166.
- [35] Ma Q C, Kobayashi E, Fan B W, et al. Automatic 3D landmarking model using patch-based deep neural networks for CT image of oral and maxillofacial surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(3): e2093. DOI:10.1002/rcs.2093
- [36] Lachinov D, Getmanskaya A, Turlapov V. Cephalometric landmark regression with convolutional neural networks on 3D computed tomography data[J]. *Pattern Recognit Image Anal*, 2020, 30(3): 512-522.
- [37] Hung K, Yeung A W K, Tanaka R, et al. Current applications, opportunities, and limitations of AI for 3D imaging in dental research and practice[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(12): 4424. DOI:10.3390/ijerph17124424
- [38] American Academy of Pediatric Dentistry. Clinical guideline on behavior management[J]. *Pediatr Dent*, 2004, 26(7): 89-94.
- [39] 冉龙宽, 樊林, 郁葱. 虚拟现实技术应用于儿童口腔治疗非药物行为引导的进展[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2020, 13(7): 391-395.
Ran Longkuan, Fan Lin, Yu Cong. Research progress on the application of virtual reality to non-drug behavioral guidance in dental treatment for children[J]. *Chinese Journal of Practical Stomatology*, 2020, 13(7): 391-395.
- [40] 任海霞, 刘颖凤, 梁慧敏, 等. 虚拟现实技术在儿童深龋治疗中对牙科畏惧的干预效果研究[J]. *国际口腔医学杂志*, 2022, 42(5): 529-536.
Ren Haixia, Liu Yingfeng, Liang Huimin, et al. Intervention effect of virtual reality technology on dental fear in the treatment of deep caries in children[J]. *International Journal of Stomatology*, 2022, 42(5): 529-536.
- [41] Eaton J J, McTigue D J, Fields H W Jr, et al. Attitudes of contemporary parents toward behavior management techniques used in pediatric dentistry[J]. *Pediatr Dent*, 2005, 27(2): 107-113.
- [42] Patini R, Staderini E, Cantiani M, et al. Dental anaesthesia for children-effects of a computer-controlled delivery system on pain and heart rate: a randomised clinical trial[J]. *Br J Oral Maxillofac Surg*, 2018, 56(8): 744-749.
- [43] Tai M C. The impact of artificial intelligence on human society and bioethics[J]. *Tzu Chi Med J*, 2020, 32(4): 339-343.
- [44] Schwendicke F, Samek W, Krois J. Artificial intelligence in dentistry: chances and challenges[J]. *J Dent Res*, 2020, 99(7): 769-774.
- [45] Khan B, Fatima H, Qureshi A, et al. Drawbacks of artificial intelligence and their potential solutions in the healthcare sector[J]. *Biomed Mater Devices*, 2023: 1-8.
- [46] You W Z, Hao A M, Li S, et al. Deep learning-based dental plaque detection on primary teeth: a comparison with clinical assessments[J]. *BMC Oral Health*, 2020, 20(1): 141. DOI:10.1186/s12903-020-01114-6
- [47] 游文喆, 郝爱民, 李帅, 等. 基于深度学习的恒牙牙菌斑智能判读系统的建立及其相关影响因素分析[J]. *中华口腔医学杂志*, 2021, 56(7): 665-671.
- [48] 姚立伟. 科技赋能儿童口腔护理, AI 互动牙刷引领行业新潮[EB/OL]. (2024-04-30)[2025-08-20]. https://www.sohu.com/a/775359720_114822
- [49] 房禹池, 杨世波, 施麦克, 等. 基于 U-Net 网络与注意力机制的儿童龋齿预防算法研究[J]. *传感技术学报*, 2025, 38(5): 817-825.
Fang Yuchi, Yang Shibo, Shi Maik, et al. Research on a pediatric dental caries prevention algorithm utilizing U-Net network and attention mechanism[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2025, 38(5): 817-825.
- [50] Schlickenrieder A, Meyer O, Schönewolf J, et al. Automated detection and categorization of fissure sealants from intraoral digital photographs using artificial intelligence[J]. *Diagnostics*, 2021, 11(9): 1608. DOI:10.3390/diagnostics11091608

(编辑:李伟)