

[DOI] 10.12016/j.issn.2096-1456.2023.04.001

· 专家论坛 ·

口腔种植决策的“类脑智能化”

陈泽涛, 曾培生, 刘海雯, 施梦汝, 陈世杰, 陈卓凡

中山大学光华口腔医学院·附属口腔医院口腔种植科 广东省口腔医学重点实验室, 广东 广州(510055)

【摘要】 现阶段的种植手术机器人已基本实现“手术操作智能”,然而,机器人种植决策的“类脑智能”仍处于理论及探索阶段。临床种植方案制定取决于种植时机、种植区域、骨量条件、种植术式、患者全身因素等,其制定过程需要评估相应临床决策指标及执行不同临床路径。本文回顾了人脑的认知行为及信息处理机制,在临床循证医学的思想及大数据、深度学习的潜力启发下,结合临床决策指标及临床路径可定量或定性分析的数据特点,提出了基于决策指标智能化预测及临床路径智能化执行的种植手术机器人种植决策类脑智能化可行方案,即“挖掘决策指标,厘清临床路径——构建决策指标大数据库——深度学习智能预测决策指标——临床路径智能执行——种植决策类脑智能化”;并结合本团队前期研究成果,以即刻种植时机决策为例,述评其类脑智能化过程,为后续种植决策全面“类脑智能化”研究提供范本。未来,挖掘并评价更多临床决策因素,并不断总结完善种植临床路径,同时采取最佳的智能化方式实现循证指标及路径的智能化预测,最终实现种植临床诊疗过程智能化,将是口腔临床医师们需要思考及努力的方向之一。

【关键词】 机器人手术; 人工智能; 智能化; 深度学习; 大数据; 认知神经科学; 循证医学; 口腔种植; 临床路径; 即刻种植

【中图分类号】 R78 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 2096-1456(2023)04-0229-08

【引用著录格式】 陈泽涛,曾培生,刘海雯,等.口腔种植决策的“类脑智能化”[J].口腔疾病防治,2023,31(4):229-236. doi:10.12016/j.issn.2096-1456.2023.04.001.

"Brain-inspired intelligence" in dental implant decision-making CHEN Zetao, ZENG Peisheng, LIU Haiwen, SHI Mengru, CHEN Shijie, CHEN Zhuofan. Institute of Stomatology & Department of Oral Implantology, Hospital of Stomatology, Guanghua School of Stomatology, Sun Yat-sen University and Guangdong Provincial Key Laboratory of Stomatology, Guangzhou 510055, China

Corresponding author: CHEN Zetao, Email: chenzt3@mail.sysu.edu.cn, Tel: 86-20-87330592

【Abstract】 At present, implant surgery robots have basically achieved "surgical intelligence", but "brain-inspired intelligence" of robots is still in the stage of theory and exploration. The formulation of a clinical implantation plan depends on the timing of implantation, implantation area, bone condition, surgical procedure, patient factors, etc., which need to evaluate the corresponding clinical decision indicators and clinical pathways. Inspired by evidence-based medicine and the potential of big data and deep learning, combined with the data characteristics of clinical decision indicators and clinical pathways that can be quantitatively or qualitatively analyzed, this review simulates the cognitive behavior and neural mechanisms of the human brain and proposes a feasible brain-inspired intelligence scheme by predicting the decision indices and executing clinical pathways intelligently, that is, "select clinical indicators and clarify clinical pathways -- construct database -- use deep learning to intelligently predict decision indicators -- intelligent execution of clinical pathways -- brain-inspired intelligence of implant decision-making". Combined with the previous research results of our team, this review also describes the process of realization of brain-inspired intelligence for immediate implant timing decisions, providing an example of the comprehensive realization of brain-inspired intelligence of implant surgery robots in the future. In the future, how to excavate and summarize other clinical decision factors and select the best way to realize the automatic prediction of evidence-based clinical indicators and pathways and finally realize the

【收稿日期】 2022-07-17; **【修回日期】** 2022-09-13

【基金项目】 国家自然科学基金面上项目(82071167);中山大学高校基本科研业务费项目青年拔尖科研人才培养项目(22ykqb06);广东省财政高水平医院建设专项资金;广州市科技计划项目(SL2022B03J00507)

【通信作者】 陈泽涛,研究员,副主任医师,博士生导师,博士, Email: chenzt3@mail.sysu.edu.cn, Tel: 86-20-87330592



微信公众号

complete intellectualization of clinical diagnosis and treatment processes will be one of the directions that dental clinicians need to strive for.

【Key words】 robotic surgical procedures; artificial intelligence; intelligentize; deep learning; big data; cognitive neuroscience; evidence-based medicine; dental implantation; clinical pathway; immediate implant

J Prev Treat Stomatol Dis, 2023, 31(4): 229-236.

【Competing interests】 The authors declare no competing interests.

This study was supported by the grants from the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 82071167); Youth Top-notch Talents Training Program by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22ykqb06); Special Fund for High Level Hospital Construction in Guangdong Province and Guangzhou Science and Technology Plan Project (No.SL2022B03J00507).

口腔健康作为人体健康的重要组成部分,是提高人群生活质量的必要保障之一。然而,我国人群的牙列缺损及缺失发生率普遍较高,根据第四次全国口腔流行病学调查结果,35~44岁中青年人群中,牙缺失率约为32.3%,65~74岁老年人当中,牙缺失率约为81.7%^[1]。牙列缺损或缺失会影响患者的咀嚼及发音功能,同时影响患者的心理健康。种植修复因其强大的咀嚼功能及较长的使用寿命等优点,成为当前牙列缺损修复的首选。

以智能手术机器人为代表的人工智能技术(artificial intelligence, AI)已经成为口腔种植科技革新的前沿热点之一。种植手术机器人经过20年的发展,已经基本实现在术前规划种植路径的前提下以高精度完成模型或动物种植手术的目标^[2-4]。然而,即使目前的种植手术机器人已基本实现“手术操作智能”,但仍需要依赖临床医师在术前针对不同患者进行种植决策及方案设计,并根据输入指令执行手术方案,无法实现种植诊疗过程完全智能化^[5-6]。

人工智能的发展离不开脑科学的进展,借鉴脑神经精细结构及信息处理加工机制所发展的类脑智能(brain-inspired intelligence),是以计算建模为手段,受脑神经机制和认知行为机制启发,并通过软硬件协同实现的机器智能,其目标是使机器以类脑的方式实现人类具有的各种认知能力及其协同机制^[7-8]。随着大数据及人工智能时代的到来,强大的算力可以支撑计算机充分利用大数据获得更多规律,进行知识的学习。因此,赋予种植手术机器人以种植决策“类脑”,使其在种植决策及方案制定上具有与临床种植医师相当的能力,经临床医师确认方案,最终实现手术操作智能前提下的种植诊疗流程完全智能化,这将是未来种植机器人研究的前沿方向之一。

本文将类脑智能视为未来种植机器人的发展方向之一,从人脑信息处理机制出发,结合类脑智能的概念及进展,阐述并展望种植决策类脑智能化可行方法;并进一步结合本团队前期研究成果,以种植临床中的即刻种植方案制定为例,探讨类脑智能在即刻种植时机智能决策中的实现过程,为后续种植决策全面“类脑智能化”研究提供范本。

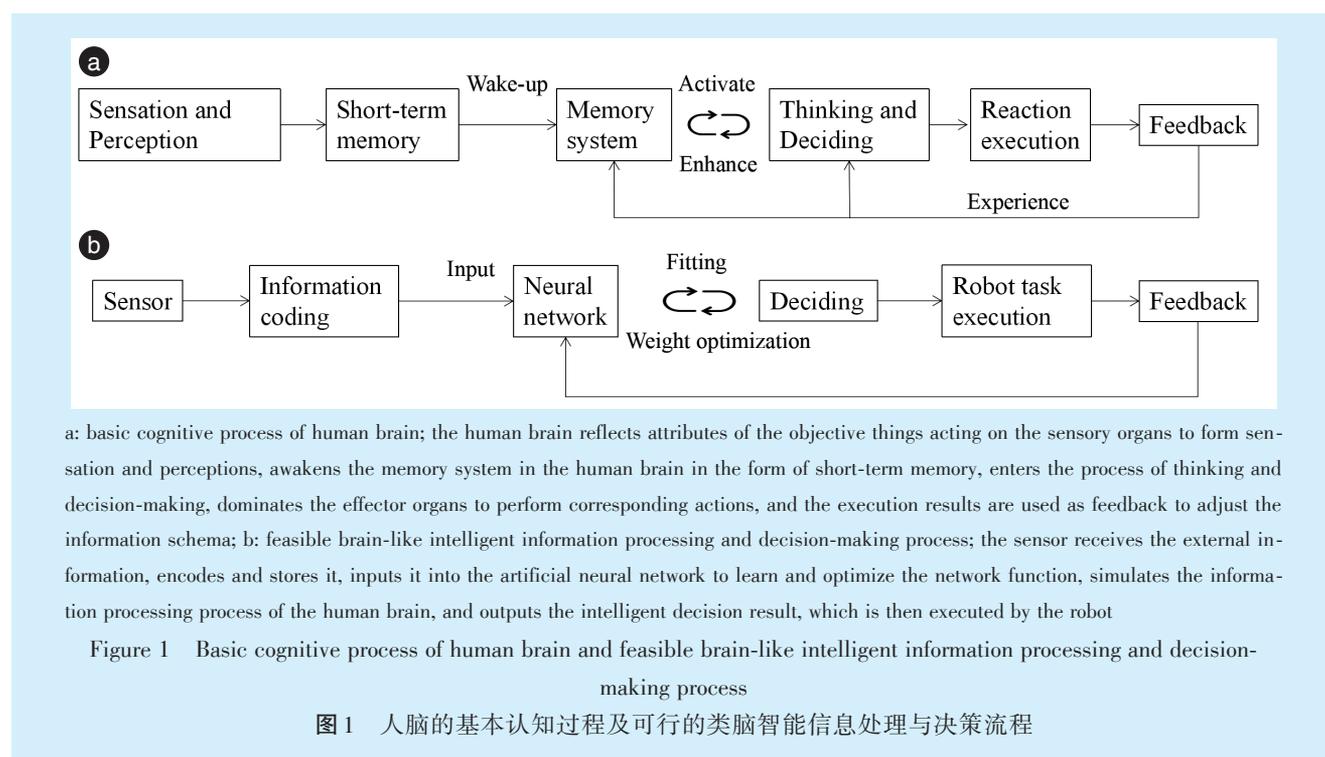
1 类脑智能可由神经网络实现种植方案智能决策

人类的认知过程可基本概括为信息的流动过程,包括信息输入、处理、输出和反馈等环节,由人的感觉、知觉、记忆、思维等认知要素组成^[9]。由人体感受器所带来的视觉及听觉等感觉构成了信息处理的第一步,直接反映客观事物的物理属性(例如物体的颜色、形状、声音等),知觉以感觉为前提,在综合了多种感觉的基础上形成的客观事物整体映像,两者共同构成了认知过程的起点。在以上信息编码通过神经系统被人脑接收后,将以短时记忆的形式唤醒人脑中的记忆系统。当某个知觉对象一旦被知觉及记忆归类确定后,将进入对信息的思维和决策过程,并经决策决定对它做出某种行动,这个决策将以指令形式输送到效应器官,支配效应器官做出相应的动作^[10]。然而,思维及决策系统并非凭空产生,是在人类认识世界的过程中通过“认知—反应执行—反馈”闭环不断完善及补充的,其中反馈是将效应器官做出相应动作的结果作为一种新的刺激,借助于反馈信息,对已有的信息图式(schema)进行修正更新,从而更为有效地调节效应器官的活动。

类脑智能,旨在利用软硬件设备,模拟人类大脑的认知行为机制及脑神经机制,使机器达到或

超越人类的智能,从而实现人类具有的多种认知能力及其协同机制^[11-12]。目前,以传感器为代表的信息接收器已在功能上不断接近人类的感受器,如视觉传感器及触觉传感器等^[13],将接收到的信息通过机器编码处理的形式进行识别,并以特定形式将数据保存,同时将信息输入思维决策端。基于人类的基本认知过程及脑神经机制,以人工神经网络(artificial neural network, ANN)为代表的AI技术在静态视觉领域模拟了人脑从接收信息到思维决策的过程,从信息处理角度对人脑神经网络进行抽象和模拟,将大量的节点(神经元)按不同的连接方式组成不同的网络,人工神经元的

输入层模拟树突接收来自其他神经元输入的信号,通过激活函数模拟轴突控制信号的输出,输出层模拟突触对结果进行输出,输出的信息传递到下一个神经元,建立神经元的数学模型^[14-15]。ANN具有可被调节的权重,随着信息输入不断学习优化,并储存下来,形成最终的网络拟合函数,经过优化后的ANN面对同样性质的信息,将通过函数拟合出相对的标准解答,从而模拟人脑的记忆唤醒、思维及决策过程^[16-17]。通过模拟人脑信息处理过程而输出的智能决策结果,再交由机器人执行,从而实现初步的类脑智能化(图1)。



如上所述,口腔种植机器人具备十分广阔的应用前景及预期的种植精度,然而,无论是主从式还是自主式机器人,在目前阶段均只实现了“手术操作智能”,仍需依赖临床医师进行术前种植决策及方案设计;另一方面,由于复杂繁琐的术前准备过程,种植手术机器人的手术时间往往比临床医师更长,其中就包含医师在术前进行种植方案的设计并导入系统的过程。如何赋予种植手术机器人以“类脑”,使其具有与临床种植医师相当的术前种植决策及方案制定能力,是研究者思考的关键问题。基于人脑的认知行为机制及脑神经机制启发,通过神经网络实现类脑智能化决策,将有望

实现种植手术全流程智能化。

2 临床决策指标及临床路径智能化是种植类脑智能的探索方向之一

为实现种植手术机器人的种植决策类脑智能化,机器人临床智能思维及决策将是关键步骤。循证医学(evidence-based medicine, EBM)背景下的临床决策并非伴随高风险及高随机性的经验决策,而是基于临床医学证据的科学决策^[18]。循证医学的实践过程需将经过严格评价的临床研究证据与临床决策相结合,执行最新最佳的循证临床实践指南(evidence-based clinical practice guide-

lines, E-CPGs)或临床路径(clinical pathway),以提高医疗的质量,规范医疗行为。在这个过程中,临床医师既是临床证据的使用者,更是临床证据的挖掘者^[19]。结合自身临床经验,临床医师依据自身在临床诊疗过程中发现的问题,通过有效地检索、搜寻回答有关问题的最可靠的证据,进行临床研究证据等级判断及临床实用性评价,并应用于临床实践中,根据实践结果进行反馈,通过“提出问题——搜集证据——评价证据——使用证据——再评价”的闭环优化,最终得到具有重要临床指示意义的临床决策指标^[20-21]。而在按照循证医学的方法广泛获取临床证据的基础上形成的一组临床指导意见,即循证临床实践指南或临床路径,具有高度科学性和权威性,用以指导临床医师作出合理的诊疗判断^[22]。

临床医师需基于临床技能采集大量多元医学信息,在获取的医学信息中找出对应的决策指标,通过整合不同决策因素并进行临床判断,快速确定每位患者的临床指征,完成风险评估、逻辑推理和最终决策,根据适合的临床证据采取有效的干预措施,最终为患者提供科学有效的治疗及支持。而“临床检查——获取决策指标信息——确定临床指征——科学干预”的临床诊疗过程即可概括为“临床路径”的执行过程^[23]。基于循证医学背景,临床诊疗过程可认为是针对不同病种的科学临床路径的执行过程。换言之,若要实现医学领域的“类脑智能”,临床决策指标智能化预测以及由此得出的临床循证路径智能化执行将是主要探索方向,这为种植手术机器人脑智能化提供了可行思路。

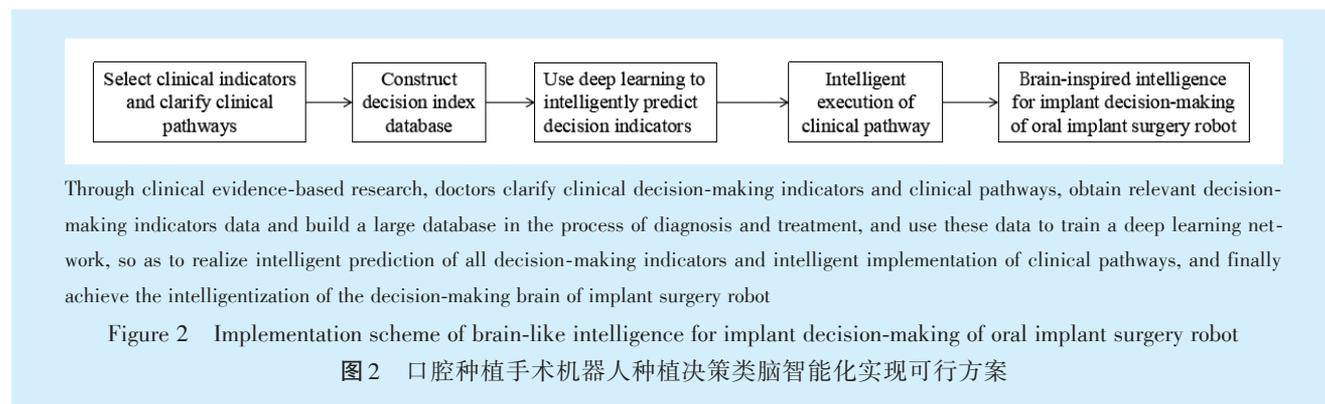
通过临床循证研究厘清临床决策指标及临床路径后,如何挖掘临床决策指标数据信息,并采用何种方式完成临床决策指标的智能化预测,从而实现临床路径的智能化执行?大数据(big data)及深度学习(deep learning)将起到重要作用。现实中,临床医师在对不同患者进行疾病评估及设计治疗方案时,需要首先获取相关的决策因素,并对这些决策指标进行定量或定性转化,方可进行评估并最终确定指征,在这个过程中将产生大量非结构化数据;另一方面,数据提取、集成、存储方式等的进步及存储介质的发展,使得具有大规模、高速更新及多样性特征的大数据库构建成为可能。而以人工神经网络为技术原理的深度学习网络的学习及训练过程则需要数据的支撑:通过标准化

流程对决策指标进行数据转换从而构建的大数据库,将为临床决策指标的智能化预测提供“学习资料”,深度学习通过把海量临床决策因素数据投放到模型中,不断自我学习,丰富自我认识,最终实现对全决策指标的智能预测及临床路径的智能执行^[24]。目前,以深度学习为代表的人工智能技术已在医学等多领域得到成熟应用,并因其精确、快速、智能等优点具有充足的发展潜力及空间。

在口腔种植领域,种植方案的设计需综合考虑多种因素,如种植位点、种植术式、种植时机及患者因素等,不同种植方案的设计均需参考多种临床决策指标。近年来,已有多位学者将种植决策因素凝练为不同适用条件下的科学种植临床路径^[25-26]。Plonka团队通过总结临床文献,将牙槽骨骨丧失高度作为评估垂直向骨增量术式的临床指标,并总结出轻度($< 4\text{ mm}$)、中度($4 \sim 6\text{ mm}$)及重度骨缺损($> 6\text{ mm}$)的推荐术式。对于轻度骨缺损,引导骨组织再生术及外置法植骨术更受推荐;中度骨缺损则推荐使用分阶段引导骨组织再生术,重度骨缺损则推荐在引导骨组织再生术的基础上使用不可吸收性膜^[25]。Shanbhag等^[27]依据上颌窦内息肉样病变、黏膜增厚程度及窦腔通畅程度等因素作为评价上颌窦炎症的评价指标,并提出上颌窦提升术适应证临床评估路径,即针对患者上颌窦影像判断是否存在黏膜增厚及息肉样病变,存在病变者进一步判断窦腔通畅程度,窦腔阻塞者及窦腔通畅但存在上颌窦炎症状者建议转诊至耳鼻喉科进行彻底治疗,不适合进行上颌窦提升术。Bassetti等^[28]根据种植位点角化龈宽度及软组织缺损程度将软组织形态分为I~IV型,分别是种植体颊部的角化龈宽度为 $\geq 2\text{ mm}$ 、种植体颊部的角化龈宽度为 $< 2\text{ mm}$ (可伴唇颊系带牵拉)、角化龈宽度为 $< 2\text{ mm}$ 伴随软组织开裂、种植体舌侧无或仅有少量角化龈,并提出推荐的软组织移植术式:对于II型,则推荐使用前庭成形术+游离龈移植术;对于III型,需要先进行上皮下结缔组织移植术+冠向复位瓣,3个月后进行隧道技术及前庭成形术+游离龈移植术;而对于IV型,则需视具体情况选择术式。Steigmann等^[29]将提出并评价唇侧骨壁厚度、骨开裂及骨开窗程度等指标,将空虚牙槽窝形态分为3型,分别是ST I型(唇侧骨壁完整)、ST II型(唇侧骨板存在骨开裂)及ST III型(唇侧骨板存在骨开窗),并总结出临床位点保存术的术式选择路径:ST I型在唇侧骨壁厚度 $< 1\text{ mm}$ 时

推荐采取胶原颗粒移植并缝合;ST II型及骨开窗的高度小于唇侧骨高度 1/3 的 ST III型则推荐将可吸收膜置于牙槽窝内覆盖裂口,充填移植物,以间断缝合将膜缝合到腭组织;严重的 ST III型则推荐使用不可吸收膜替代可吸收膜,并视情况考虑结合牙周手术。可见,临床路径的总结有利于规范临床诊疗流程,而其中的临床指标均为定性或

定量指标,可运用 AI 技术进行智能预测。然而,运用 AI 手段智能化执行临床路径的相关研究仍少见报道。因此,挖掘种植方案相关决策指标,厘清种植方案设计路径,并通过大数据及人工智能实现全部种植方案的智能化设计,是实现种植手术机器人种植决策类脑智能化的可行方案之一,具有广泛前景(图 2)。



3 以即刻种植时机决策初步探讨种植类脑智能化

即刻种植时机的临床决策一直被认为是种植临床中的难点,结合 ITI 种植指南及多项临床研究^[30],即刻种植方案的制定涉及多项关键决策因素的综合评估,以获得理想和可预测的结果。以外科解剖因素为例,足够的前牙唇侧骨壁骨厚度将为即刻种植牙槽嵴丰满度及远期美学预后提供基本保障^[31];前牙区牙龈生物型用于评估即刻种植美学风险^[32];种植位点根尖区骨量将是决定即刻种植初期稳定性的重要因素^[33];牙根倾斜度能提示前牙周围软硬组织状态,并以修复为导向为即刻种植时机决策及术式提供参考等^[30]。除此之外,修复因素、美学因素及患者全身因素等均可能影响即刻种植方案的制定及设计。临床医师在对前牙美学区即刻种植病例进行临床评估时,往往存在耗时长、考虑不全面、错误率高等问题,而种植决策类脑智能的研究与开发有望实现即刻种植时机智能高效评估与决策。以下将总结团队研究成果,就即刻种植时机决策探讨其类脑智能化的实现过程。

3.1 明晰即刻种植时机决策指标,总结临床路径

即刻种植时机决策需要术前审慎细致的评估,统筹考虑各项决策指标。根据上文提出的种植机器人种植决策类脑智能化实现方案,首要任务为根据临床循证证据总结即刻种植时机决策相

关指标,并厘清临床路径。因此,本团队在前期广泛搜集了与即刻种植时机决策相关的临床决策指标,并评判其临床研究证据等级,明晰高质量决策指标,以支持后续智能化研究^[34]。其中,决策指标包括修复因素(磨牙症、修复空间)、患者全身因素(双磷酸盐药物史、放疗史、骨质疏松症、糖尿病)、初期稳定性、局部感染因素、美学因素(唇侧骨壁厚度、牙龈生物型)及骨量因素等,总结出是否可进行即刻种植的适应证、相对及绝对禁忌证,以此探讨并提出了即刻种植时机决策临床路径,即按照修复因素、全身因素、初期稳定性评估、局部感染因素、美学因素、骨量因素依次进行即刻种植适应证评估。该临床路径总结了现阶段与即刻种植时机相关的大部分决策因素,有利于临床医师更全面科学地评估是否可进行即刻种植。其中路径中的决策指标均为定性及定量指标,可支持指标数据化及深度学习过程。

3.2 构建智能化所需原始资料库

进一步,根据临床路径中所涉及的决策指标,进行数据库构建,在足够的数据库支撑下方可进行深度学习。其中,团队选取即刻种植时机决策路径中包含的牙根倾斜度(sagittal root angle)指标,在严格的纳入及排除标准下获取患者 CBCT 文件,并采用标准化方法获取 CBCT 影像上前牙标准矢状截面的同时进行数据提取、清洗、集成及储存,以获得包括牙根倾斜度在内的多项上前牙软硬组织

指标数据,构建训练数据库,并针对数据进行统计分析,阐述矢状面交角在即刻种植时机决策中的临床指示意义,辅助指导临床决策^[35]。根据本团队研究成果,矢状面交角不仅与即刻种植相关软硬组织指标存在一定相关性,也可单独作为一项决策指标指示即刻种植时机决策及种植体三维位置,具有一定临床意义。

3.3 深度学习完成临床决策指标的智能化预测

在此基础上,完成即刻种植时机决策临床路径中的所有决策指标的智能化预测,将实现该路径的智能判断及执行,使种植手术机器人获得与临床医师相当的即刻种植时机决策能力。为此,本团队迈出了智能化预测即刻种植时机决策相关指标的第一步,实现了前牙牙根矢状面角度的智能输出。卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)是一类包含卷积计算且具有深度结构的神经网络,是深度学习(deep learning)的代表算法之一。为最大限度接近人脑思维过程,实现输入原始矢状面截图即可预估上前牙矢状面交角的智能效果,本团队采用“端对端”(end-to-end)弱监督训练方法,将原始训练资料按一定比例划分为训练集、验证集及测试集,以未加任何额外标注(label)的原始图像及角度标签作为训练对象,输入选定的CNN中进行模型训练及参数优化,并模拟人脑视觉处理中对感兴趣区域的关注,采取类激活映射等权重可视化方法解释模型热区,最终成功构建牙根倾斜度AI预测工具,经过算法级及数据级的结果评价,证实模型的有效性及其精确性,最终实现高精度输出上前牙CBCT矢状截面牙根倾斜度指标的目标^[35]。

在未来完成所有即刻种植时机决策相关临床指标的智能化预测及循证临床路径的智能化执行后,将实现即刻种植时机决策类脑智能化。以此作为启发及示范,最终将完成种植手术机器人临床种植决策类脑智能化。

4 总结与展望

在医学人工智能领域,利用传感器将外界信息以机器能识别的形式进行输入,并通过医学类脑智能进行智能决策,在手术机器人已基本达成“手术操作智能”的前提下,将实现医疗领域的完全智能化。然而,一方面,用于确定临床决策指标的临床检查手段仍受限于检查方法不统一、检查精度不理想等缺陷,甚至可能出现检查结果前后

不一、临床医师难以定论等问题,导致智能化应用受限,但随着检查技术的进步及检查方法的规范,未来此类问题将逐渐被解决;另一方面,人类对人脑的信息处理过程仍存在诸多未知,现阶段仍不存在任何一个智能系统能够在多方面接近人脑水平,例如,现阶段的机器在信息处理效率及能耗上均劣于人脑,人脑可通过关联想等心理活动对无关事物进行记忆唤醒及思维决策,并通过行为反馈不断丰富优化思维方式,这意味着,目前阶段的类脑智能仍只能停留在初步探索及类比模拟阶段^[8,14]。但是,这并不意味着医学领域类脑智能的探索及研发只能停滞不前。从应用角度出发,在大数据时代及人工智能逐步发展的今天,以ANN为代表的模拟人脑信息处理方式的智能化预测手段已达到一个理想的高度,配合临床决策过程循证及指标可数据化的特点,这意味着大数据及深度学习所支撑的临床决策指标智能化预测及临床循证路径智能化执行,将是实现医学决策类脑智能化的探索方向之一,而随着脑科学研究的不断深入,医学类脑智能在处理效率及思维方式等方面仍有上升的空间^[36]。同时,本文作者并不否认临床医师在未来的智能化诊疗趋势中所起的重要作用,出于伦理及安全性等考虑,临床医师应当作为类脑智能临床应用的把关人,以兼顾类脑智能应用的高效性及可靠性。

本文以即刻种植时机智能化决策为例,就口腔种植领域中种植手术机器人的类脑智能化提出了探索方案,通过挖掘临床决策指标,厘清临床决策路径,并构建决策指标大数据库,以深度学习分别完成决策指标智能预测、临床路径智能执行,最终实现种植手术智能化设计,即实现种植手术机器人种植决策类脑智能化。未来,挖掘并评价临床决策指标并总结出更多科学循证的临床路径,采取标准化方式获取对应指标数据并建立大数据库,并运用智能化方法完成临床指标及路径的智能预测,最终实现种植临床诊疗过程智能化,将是口腔临床医师们需要思考及努力的方向之一。

【Author contributions】 Chen ZT design the article structure and revised the article. Zeng PS wrote the article. Liu HW, Shi MR, Chen SJ collected the references and revised the article. Chen ZF revised the article. All authors read and approved the final manuscript as submitted.

参考文献

- [1] Guo J, Ban JH, Li G, et al. Status of tooth loss and denture restoration in Chinese adult population: findings from the 4th National

- Oral Health Survey[J]. *Chin J Dent Res*, 2018, 21(4): 249-257. doi: 10.3290/j.cjdr.a41083.
- [2] Wu Y, Wang F, Fan S, et al. Robotics in dental implantology[J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2019, 31(3): 513-518. doi: 10.1016/j.coms.2019.03.013.
- [3] Tao B, Feng Y, Fan X, et al. Accuracy of dental implant surgery using dynamic navigation and robotic systems: an *in vitro* study[J]. *J Dent*, 2022, 123: 104170. doi: 10.1016/j.jdent.2022.104170.
- [4] Grischke J, Johannsmeier L, Eich L, et al. Dentronics: towards robotics and artificial intelligence in dentistry[J]. *Dent Mater*, 2020, 36(6): 765-778. doi: 10.1016/j.dental.2020.03.021.
- [5] 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.
- Bai SZ, Ren N, Feng ZH, et al. Animal experiment on the accuracy of the autonomous dental implant robotic system[J]. *Chin J Stomatol*, 2021, 56(2): 170-174. doi: 10.3760/cma.j.cn112144-20210107-00008.
- [6] Rawal S. Guided innovations: robot-assisted dental implant surgery [J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(5): 673-674. doi: 10.1016/j.prosdent.2022.03.029.
- [7] Strukov D, Indiveri G, Grollier J, et al. Building brain-inspired computing[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 4838. doi: 10.1038/s41467-019-12521-x.
- [8] Hu B, Guan ZH, Chen G, et al. Neuroscience and network dynamics toward brain-inspired intelligence[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(10): 10214 - 10227. doi: 10.1109/TCYB.2021.3071110.
- [9] Butz MV. Resourceful event-predictive inference: the nature of cognitive effort[J]. *Front Psychol*, 2022, 13: 867328. doi: 10.3389/fpsyg.2022.867328.
- [10] Zhao WJ, Coady A, Bhatia S. Computational mechanisms for context-based behavioral interventions: a large-scale analysis[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2022, 119(15): e2114914119. doi: 10.1073/pnas.2114914119.
- [11] Roy K, Jaiswal A, Panda P. Towards spike-based machine intelligence with neuromorphic computing[J]. *Nature*, 2019, 575(7784): 607-617. doi: 10.1038/s41586-019-1677-2.
- [12] Zhang Y, Qu P, Ji Y, et al. A system hierarchy for brain-inspired computing[J]. *Nature*, 2020, 586(7829): 378-384. doi: 10.1038/s41586-020-2782-y.
- [13] An J, Chen P, Wang Z, et al. Biomimetic hairy whiskers for robotic skin tactility[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(24): e2101891. doi: 10.1002/adma.202101891.
- [14] Dellaferriera G, Woźniak S, Indiveri G, et al. Introducing principles of synaptic integration in the optimization of deep neural networks[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 1885. doi: 10.1038/s41467-022-29491-2.
- [15] Silva F, Sanz M, Seixas J, et al. Perceptrons from memristors[J]. *Neural Netw*, 2020, 122: 273-278. doi: 10.1016/j.neunet.2019.10.013.
- [16] Zhang C, Correia C, Weiskittel TM, et al. A knowledge-based discovery approach couples artificial neural networks with weight engineering to uncover immune-related processes underpinning clinical traits of breast cancer[J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 920669. doi: 10.3389/fimmu.2022.920669.
- [17] Song Y, Lukasiewicz T, Xu Z, et al. Can the brain do backpropagation? - - Exact implementation of backpropagation in predictive coding networks[J]. *Adv Neural Inf Process Sys*, 2020, 33: 22566-22579.
- [18] Blackstone EH. Precision medicine versus evidence-based medicine: individual treatment effect versus average treatment effect[J]. *Circulation*, 2019, 140(15): 1236-1238. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.119.043014.
- [19] Chiappelli F. Evidence-based dentistry: two decades and beyond [J]. *J Evid Based Dent Pract*, 2019, 19(1): 7-16. doi: 10.1016/j.jebdp.2018.05.001.
- [20] Scott IA. Machine learning and evidence-based medicine[J]. *Ann Intern Med*, 2018, 169(1): 44-46. doi: 10.7326/M18-0115.
- [21] Majoie HJM, van Gaalen J, Verstegen DML, et al. Cost-conscious high-quality care and guideline development education: a strange contradiction or simple solution?[J]. *Eur J Neurol*, 2019, 26(4): e48-e49. doi: 10.1111/ene.13855.
- [22] Askari M, Tam J, Klundert J. The effectiveness of clinical pathway software in inpatient settings: a systematic review[J]. *Int J Med Inform*, 2021, 147: 104374. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2020.104374.
- [23] Miah SJ, Camilleri E, Vu HQ. Big data in healthcare research: a survey study[J]. *J Comput Inform Syst*, 2022, 62(3): 480-492. doi: 10.1080/08874417.2020.1858727.
- [24] Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence[J]. *Nat Med*, 2019, 25(1): 44-56. doi: 10.1038/s41591-018-0300-7.
- [25] Plonka AB, Urban IA, Wang HL. Decision tree for vertical ridge augmentation[J]. *Int J Periodont Rest*, 2018, 38(2): 269-275. doi: 10.11607/prd.3280.
- [26] Valentini P, Artzi Z. Sinus augmentation procedure via the lateral window technique-reducing invasiveness and preventing complications: a narrative review[J]. *Periodontol 2000*, 2022. doi: 10.1111/prd.12443.
- [27] Shanbhag S, Karnik P, Shirke P, et al. Cone-beam computed tomographic analysis of sinus membrane thickness, ostium patency, and residual ridge heights in the posterior maxilla: implications for sinus floor elevation[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2014, 25(6): 755-760. doi: 10.1111/clr.12168.
- [28] Bassetti M, Kaufmann R, Salvi GE, et al. Soft tissue grafting to improve the attached mucosa at dental implants: a review of the literature and proposal of a decision tree[J]. *Quintessence Int*, 2015, 46(6): 499-510. doi: 10.3290/j.qi.a33688.
- [29] Steigmann L, Di Gianfilippo R, Steigmann M, et al. Classification based on extraction socket buccal bone morphology and related treatment decision tree[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(3): 733. doi: 10.3390/ma15030733.
- [30] Shi M, Wang X, Zeng P, et al. Analysis of the sagittal root angle and its correlation with hard and soft tissue indices in anterior

- teeth for immediate implant evaluation: a retrospective study[J]. BMC Oral Health, 2021, 21(1): 494. doi: 10.1186/s12903-021-01848-x.
- [31] Blanco J, Carral C, Argibay O, et al. Implant placement in fresh extraction sockets[J]. Periodontol 2000, 2019, 79(1): 151-167. doi: 10.1111/prd.12253.
- [32] Heimes D, Schiegnitz E, Kuchen R, et al. Buccal bone thickness in anterior and posterior teeth-a systematic review[J]. Healthcare (Basel), 2021, 9(12): 1663. doi: 10.3390/healthcare9121663.
- [33] Glibert M, Östman S, De Bruyn H, et al. The influence of initial hard and soft tissue dimensions on initial crestal bone loss of immediately loaded dental implants[J]. Int J Periodontics Restorative Dent, 2018, 38(6): 873-878. doi: 10.11607/prd.3458.
- [34] Shi M, Liu H, Wang X, et al. A decision tree with updated views of timing of implant placement for single maxillary anterior residual root[J]. J Dent Oral Biol. 2022, 7(1): 1185.
- [35] Lin Y, Shi M, Xiang D, et al. Construction of an end-to-end regression neural network for the determination of a quantitative index sagittal root inclination[J]. J Periodontol, 2022. doi: 10.1002/JPER.21-0492.
- [36] Samek W, Montavon G, Lapuschkin S, et al. Explaining deep neural networks and beyond: a review of methods and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(3): 247-278. doi: 10.1109/JPROC.2021.3060483.

(编辑 周春华,曾曙光)



官网



【通信作者简介】 陈泽涛,中山大学光华口腔医学院·附属口腔医院研究员,副主任医师,博士生导师;现任广东省牙颌系统修复重建技术与材料工程技术研究中心主任;并担任中华口腔医学会口腔生物医学专业委员会常务委员、中国生物材料学会青年委员会委员、广东省口腔医学会口腔种植专业委员会委员、广东省医院协会医院科研实验室建设与管理专业委员会委员;担任 *Front Bioeng Biotech*、《口腔疾病防治》等杂志编委。从事口腔种植相关医教研工作,聚焦口腔种植软硬组织免疫再生修复及口腔种植决策人工智能化研究,成果发表于 *Adv Funct Mater*, *Adv Sci*, *ACS Nano*, *Mater Today*, *Biomaterials*, *J Periodontol* 等,共发表SCI学术论文42篇(以第一作者/通信作者发表大于10分的SCI学术论文12篇);主编《口腔基础研究导论》(人民卫生出版社)并担任该课程负责人;入选国家海外高层次人才计划、广东省珠江人才计划青年拔尖人才项目;主持ITI Research Grant(2项),The Osteology Foundation Grant(2项),国家重点研发计划(课题负责人),国家自然科学基金(面上、青年)、广东省杰出青年科学基金项目等项目。

入选国家海外高层次人才计划、广东省珠江人才计划青年拔尖人才项目;主持ITI Research Grant(2项),The Osteology Foundation Grant(2项),国家重点研发计划(课题负责人),国家自然科学基金(面上、青年)、广东省杰出青年科学基金项目等项目。