

· AI+慢性病康复管理专题 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.24.007

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20241202.1456.002\(2024-12-02\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20241202.1456.002(2024-12-02))

人工智能在三叉神经痛诊疗中的应用*

楚晓红,刘勇,孙娟[△]

(陆军军医大学第二附属医院疼痛康复医学科,重庆 400037)

[摘要] 三叉神经痛(TN)在面部疼痛中发病率高且疼痛程度剧烈。从病因学角度来看,原发性 TN 发病机制尚未明确,常常与血管神经压迫相关。继发性 TN 与多发性硬化或小脑-桥脑角肿瘤和带状疱疹感染相关。特发性 TN 原因不明确。药物治疗和手术干预是临床常用的治疗手段,但许多患者无法根治疼痛会反复发作。人工智能(AI)已广泛应用于不同医学领域,实现精准诊断、治疗方案优化及综合评估方面。该文旨在综述 AI 在 TN 诊断和治疗中的应用进展。

[关键词] 三叉神经痛;血管神经压迫;球囊压迫术;微血管减压术;人工智能

[中图分类号] R493 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)24-3720-06

Application of artificial intelligence in diagnosis and treatment of trigeminal neuralgia*

CHU Xiaohong, LIU Yong, SUN Juan[△]

(Department of Pain and Rehabilitation Medicine, Second Affiliated Hospital, Army
Military Medical University, Chongqing 400037, China)

[Abstract] Trigeminal neuralgia (TN) has a high incidence rate and severe pain in facial pain. From the angle of etiology, primary TN pathogenesis is not yet clear, often associated with neurovascular compression. Secondary TN is associated with multiple sclerosis or cerebellopontine angle tumors and herpes zoster infection. The cause of idiopathic TN is unclear. Drug therapy and surgical intervention are commonly used in clinical treatment, but many patients have no cure and the pain comes repeatedly. Artificial intelligence (AI) has been widely used in different medical fields to achieve the accurate diagnosis, treatment regimen optimization and comprehensive assessment. This article aims to review the application progress of artificial intelligence in the diagnosis and treatment of TN.

[Key words] trigeminal neuralgia; blood vessels nerve compression; balloon compression; microvascular decompression; artificial intelligence

三叉神经痛(TN)是已知最剧烈的神经痛疾病之一^[1],严重影响患者的日常生活并伴随不同程度的焦虑、抑郁症状。虽然 TN 病因不明,但国内外公认的病因学分类为原发性和继发性 TN^[2]。原发性 TN 分为经典 TN(血管压迫神经引起),特发性 TN(缺乏明确的原因)。继发性 TN 由桥小脑角肿瘤或多发性硬化症等引起。其中有明确病因的继发性 TN 还包括带状疱疹后 TN^[3]。一方面生物标志物和影像学评估对 TN 的病因诊断有了新的认识,另一方面球囊压迫术(BCP)、微血管减压术(MVD)被认为是治疗原发性 TN 最有效的治疗方法^[3]。但确定每个患者的病因以及制订相应的治疗方案及疗效评估并有较大难度,因为 TN 作为头面痛的重要疾病之一,常被误诊为偏头

痛或者牙痛。利用计算机技术捕捉面部表情,人工智能(AI)模型对疼痛水平进行评估,可以提高诊断的准确率^[4]。AI 是利用计算机技术研究和开发,用于模拟、延伸和扩展人类智能的理论、方法、技术和应用系统的一门新兴技术学科。利用 AI 技术以实现精确诊断,从而选择最佳治疗方案^[5],本研究旨在综述 AI 在 TN 诊断、治疗及疼痛评估中的应用。

1 AI 在 TN 诊断中的作用

1.1 TN 的病理生理机制和假说

病理生理学认为,在原发性 TN 患者中,三叉神经被基底动脉的小分支,通常是小脑上动脉或静脉压迫。然而神经和血管之间的简单接触似乎不足以引起或解释该疾病的发生机制。对压迫神经的血管,应

清晰展示异常血管及其对神经造成的形态改变,如扭曲或萎缩等现象^[5-9]。利用 MRI 及三维成像技术可以显示神经的微结构变化^[10],利用弥散张量成像可以量化神经受压部位,纤维束造影可以显示局灶性脱髓鞘和水肿^[11-12]。当神经受压后髓鞘变薄,轴突钠离子内流增多,泵出减少,导致轴突过度兴奋,从而出现异位放电。长期慢性疼痛刺激可能会导致皮层、皮层下神经元过度兴奋或者兴奋减少^[13]。因此,检测皮层或皮层下神经元兴奋性,可以对 TN 进行辅助诊断。但继发性和特发性 TN 原因并不明确,诊断相对较困难,常常被误诊。临床诊断上常常基于患者的临床表现作出判断。AI 技术基于三叉神经和血管密切走行,皮层及皮层下神经元兴奋的特点,以形成三叉神经的特征模式,从而进一步提高诊断的精准度。

1.2 TN 的临床特征

TN 的临床特征主要表现在以下 3 个方面:首先,原发性 TN 疼痛局限于三叉神经一个或多个分支,右侧多于左侧,且女性多于男性。其次,突发短暂剧烈的疼痛。再次,疼痛被面部或口腔内无害刺激引起,91%~99% 的患者有“扳机点”(疼痛超敏部位,轻微刺激可以诱发剧烈疼痛,常位于鼻翼旁和口周)^[14]。继发性 TN 临床特征与原发性 TN 相似,但是继发性 TN 患者更年轻,且面部感觉容易丧失,双侧疼痛更常见。但是,仅根据患者临床表现和影像学表现进行盲测,诊断有一定的局限性,无法更精准的进行判断。机器和深度学习算法已经发展到可以解决现实世界中各种关键的计算机视觉问题,比如面部表情识别技术,就是最有前景的领域之一,可以大大弥补人工盲测面部疼痛表情变化的缺陷^[15]。

1.3 AI 在 TN 诊断中的应用

区别于传统影像学检查,AI 基于 TN 的病理性改变和特征性临床表现及影像学改变,可以智能构建皮质和皮质下区域的特征模式,如卷积神经网络(CNN)和图卷积神经网络(GCNN)可以检测到皮质区域的变化^[7];另一方面,AI 可以勾画小脑-桥脑角,根据解剖学差异智能识别其中差异特征,从而明确病因。运用人脸识别技术,根据患者疼痛表现和面部特征性表情变化,已经实现智能识别不同类型的面部疼痛^[16]。研究发现,某些皮质区域只被传统的相关方法激活,而其他的区域则可以被 CNN 和 GCNN 检测到^[17]。将这些方法结合起来,有助于实现对三叉神经痛更全面的理解^[13]。机器学习可以自动分割白质连接,根据皮质和皮质下形态学特征构建模型,可以分析三叉神经与脑桥,脑桥与丘脑及与皮质之间连接的差异^[18]。与常规方法相比较,机器学习具有很高的可靠性,准确率相较于传统方式有很大的提升^[14]。利用深度学习网络,

可以对 TN 节前眼支、上颌支、下颌支进行分割,并提取影像学特征,以鉴别 TN 和面部其他疾病^[19]。

2 AI 在 TN 治疗中的作用

2.1 TN 的药物和手术治疗

药物治疗中卡马西平和奥卡西平是首选,几乎 90% 的患者疼痛可得到一定程度的缓解^[20]。局部麻醉药(如利多卡因)、阿片类药物、钠通道阻滞剂和 A 型肉毒毒素可考虑作为二线治疗药物^[21]。药物的不良反应不可忽视,包括头晕、复视、共济失调等。但药物治疗的规律和不同患者适宜药物的筛选并无确切标准。手术治疗作为药物治疗的补充,主要包括 BCP、MVD 和伽玛刀,术后并发症也常与治疗效果同时出现。BCP 术后常见的并发症包括面部感觉麻木或感觉障碍、三叉神经抑制反应、单纯疱疹及咬肌无力等,少见并发症如无菌性脑膜炎、动眼神经麻痹等^[22]。MVD 术后可能会出现脑脊液漏、耳鸣、面部麻木等症状^[23]。精准定位是手术治疗的关键^[24],有助于减少并发症,而 AI 辅助系统在疾病精准定位上也有了新的突破。

2.2 AI 在 TN 治疗中的应用

在药物治疗方面,通过数据挖掘和网络药理学分析 TN 的用药规律和作用机制^[25],为智能筛选药物提供了可能。运用 AI 模型,为个体患者推荐合适的药物,辅助人工监督和干预对药物治疗决策系统至关重要,可以进一步确保药物治疗的安全性和有效性^[26]。在手术治疗方面,利用锥形束计算机断层扫描建立 AI 数据,自动检测和定位三叉神经走行位置,明确治疗靶点,可以明显提高治疗的精准度^[27]。FU 等^[23]使用 3D U-net 网络在 3D FIESTA 序列上分割三叉神经,并在磁共振血管造影(MRA)中分割血管,结合两个分割结果可以自动识别神经与血管的关系。CAS-CELLA 等^[28]提出一种基于反向边缘注意机制的卷积神经网络(ReNET),实现了三维大脑血管分割和曲面重建。罗正等^[29]运用 Res2Block 算法,使用 CS2Net 粗分割三叉神经、血管,CS2Net 是专为管状结构分割而设计的算法,然后再运用 3D U-net 细化神经、血管的边界,表现出良好的分割结果。运用深度学习网络方法,在 MVD 手术中可以实时分割血管和颅神经;AI 还可以建立术后结局的预测模型,预测 MVD 术后的复发,以及预测伽玛刀放射外科(GKRS)的术后结局^[30],预测内容包括疼痛减轻和感觉减退并利用皮质厚度和区域表面积的 MRI 数据建立模型,还可以显示出对 1 年 GKRS 反应的预测能力^[31]。随着技术的进步,AI 的应用越来越多地集中于个性化治疗方案的开发,对于 TN 这种复杂且严重影响生活质量的疾病来说尤其重要。首先,AI 技术

能够通过高级图像处理和机器学习算法提高对三叉神经和相关结构的可视化。例如,使用高分辨率的 MRI 扫描数据, AI 算法可以细致地识别并区分神经组织和周围的血管,这对于手术治疗如 MVD 至关重要。通过精确地确定压迫神经的血管位置,外科医生可以更有针对性地进行手术,减少手术风险,提高成功率^[32]。其次, AI 的应用不仅限于手术前的准备,在手术过程中实时 AI 辅助系统能够提供即时的反馈和指导,帮助外科医生调整手术策略^[33]。例如,通过实时图像分析, AI 系统可以警告医生关于某些高风险的操作区域,或是提供关于如何最有效地避免神经损伤的建议。术后, AI 同样发挥着重要作用。通过分析大量的患者术后恢复数据, AI 可以建立模型以预测患者的恢复过程和潜在的复发风险,这样的预测不仅帮助医生制订更为个性化的后续治疗计划,还可以在早期阶段预警可能的并发症,从而进行及时干预^[34]。再次, AI 的应用也扩展到了疼痛管理和长期监测。通过智能穿戴设备收集的患者生理数据,结合 AI 算法分析,医生能够更好地理解患者的疼痛模式和生活质量的变化,据此调整药物治疗方案或是进行其他形式的干预。最后,随着人工智能技术的不断发展和完善,未来在三叉神经痛治疗领域可能会出现更多创新的应用。例如,通过增强现实(AR)或虚拟现实(VR)技术,结合 AI 模型,可以创建模拟手术环境供医生训练或事先模拟手术过程,以此提高手术安全性和效率^[35-36]。

3 AI 在 TN 疼痛管理中的作用

疼痛管理一直是临床实践中的一个关键问题,疼痛评估是早期诊断、监测疾病进展、选择治疗方案、验证治疗效果的重要步骤。传统的疼痛评估方法主要依靠患者的自我报告评分,这可能会受到文化、心理和社会偏见等多种因素的影响。TN 程度剧烈,且容易复发。患者在长期承受剧烈疼痛和反复用药或手术治疗的情况下,患者及患者家属心理会造成巨大影响^[37],因此疼痛管理是一个非常重要的环节。疼痛管理包含医生、护士及患者本人或家属的管理, AI 的使用可能是一个重要的解决方案。疼痛的自动测量可以减轻照顾者的负担,并提供及时的预警。计算机视觉可以通过临床使用的实时检测和前瞻性疼痛研究的数据记录来改善 TN 疼痛监测。 AI 通过面部图像评估,从面部图像中准确提取图形数据,从而自动分析评估疼痛强度^[38]。机器学习、自然语言处理、计算机视觉、可穿戴设备和传感器等各种 AI 技术可用于疼痛的评估、监测以及预测结局^[39-40]。实施 AI 技术可以分析多种数据,包括自我报告疼痛量表、面部表情、行为和生理信号,以客观评估疼痛强度。与单纯

主观自我报告相比,多模态模型能够提供更准确、更全面的疼痛评估和管理^[41]。 HWANG 等^[42]评估了成人术后疼痛,检测疼痛的敏感性达到了 89.7%,对于重度疼痛达到了 77.5%,对疼痛强度的准确性达 53%。基于 AI 的早期检测和预防干预技术可以检测到患者行为的变化,甚至是疼痛强度、持续时间、类型或模式的微小变化。通过早期干预,可进一步防止疼痛进展。

在连续性、动态性和个性化疼痛评估方面, AI 应用于多种传感器和算法,使得实时监控疼痛成为可能,从而优化治疗策略并增进患者的疗效。首先, AI 通过整合可穿戴设备持续跟踪患者的生理和行为数据,提供疼痛管理的新视角。这些设备监测心率、皮肤电反应、体温等生理响应,为疼痛反应的生物标志提供数据支持^[43]。此外,分析患者的行为模式和睡眠质量, AI 能帮助医生判断疼痛如何影响患者的日常活动,并据此调整治疗方案。其次,应用自然语言处理技术分析患者的语音和语言模式也是 AI 在疼痛评估中的重要应用。通过提取患者对话中的疼痛描述,如频率、位置及强度,结合传统评分系统,为医生提供全面的疼痛评估。 AI 还能预测疼痛的发展趋势,通过深入分析患者的历史健康数据,识别出疼痛恶化的早期指标^[17]。例如, AI 可以根据生理数据和生活习惯预测哪些患者可能由急性疼痛演变为慢性疼痛,并提早介入。此外, AI 支持医生制订个性化疼痛管理计划,根据患者的具体疼痛类型和个体反应差异,推荐适宜的药物治疗、物理治疗或心理治疗方案。这种个性化方法不仅提高治疗效果,还减少了患者的不适和治疗相关的不良反应。最后, AI 的高级数据分析能力可为医疗研究开辟新天地。通过广泛的数据采集与分析,研究者能深入探究疼痛的生理及心理机制,为新的治疗药物和方法的开发提供科学依据^[44-47]。同时,这些数据还能用于评价现行治疗方法的成效,为临床实践提供反馈与改进建议。因此, AI 在疼痛管理中的应用正在开启新的可能性,通过其个性化和实时监控的能力,有望极大提升疼痛治疗的精确性和效果,显著改善患者的生活质量。

4 小结和展望

TN 作为一种复杂且症状剧烈的神经疾病,其诊断和治疗过程中的挑战促使医疗行业不断探索更先进的技术解决方案。在这一过程中, AI 技术的应用展示了其在提高诊断精度和治疗效率方面的潜力。首先在 MRI 上,周围血管是否压迫三叉神经以及神经本身是否变性是判断 TN 病理状态的关键影像学指标。基于深度学习的超分辨率在从输入数据中学习复杂模式和重建精细纹理信息方面具有显著优势,

与传统方法相比,图像质量得到了更高的改善,且三叉神经的纹理信息失真最小,从而对 TN 进行准确的诊断和治疗^[25]。其次,PBC 和 MVD 为 TN 主要手术方式,智能识别和精准定位是手术成功的关键。AI 技术能够通过精确的图像分析和模式识别帮助医生识别神经路径和周围血管的确切位置^[48]。这一点对于 MVD 等手术尤为重要,因为手术的成功很大程度上依赖于准确的神经和血管定位。AI 辅助的图像分析工具能够提供比传统图像更清晰、更详细的视图,使手术更加安全和有效。再次,AI 在术前疗效评估具有一定价值。它可以帮助在困难和复杂的情况下检测疼痛,例如无法进行语言交流的患者、高龄危重患者。在术后疼痛评估和管理中,通过对疼痛相关数据的实时分析,可以提供持续的疼痛评估,帮助医生调整镇痛策略,以适应患者的实际痛感,了解患者恢复情况^[49]。此外,AI 可以通过模拟不同的治疗方案,预测患者对特定治疗的反应,从而进一步提供个性化治疗计划,优化治疗成果。尽管 AI 在 TN 治疗中展现出巨大的潜力和优势,但其实际应用仍面临诸多挑战。技术的集成、数据的隐私和安全性,以及伦理问题的解决都是推广 AI 技术必须考虑的重要方面。此外,医生和技术人员需要进行充分的培训,以充分利用 AI 技术的潜力,确保技术的正确实施和使用。随着技术的不断发展和完善,预计 AI 将在未来的 TN 疗实践中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] CHEN Q, YI D I, PEREZ J N J, et al. The Molecular basis and pathophysiology of trigeminal neuralgia[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(7):3604.
- [2] CRUCCU G, DI STEFANO G, TRUINI A. Trigeminal Neuralgia[J]. *N Engl J Med*, 2020, 383(8):754-762.
- [3] FINNERUP N B. Trigeminal neuralgia and the merit of small clinical trials[J]. *Lancet Neurol*, 2022, 21(11):951-953.
- [4] KUMARAN S P, GURRAM S L, VISWAMITRA S, et al. Utility of DTI (Diffusion Tensor Imaging) metrics to study microstructural changes of trigeminal nerve in patients with trigeminal neuralgia (TN)[J]. *Neurology India*, 2022, 70(1):270-274.
- [5] HWANG H J, PARK K C, KANG B S, et al. Deep Learning super-resolution technique based on magnetic resonance imaging for application of image-guided diagnosis and surgery of trigeminal neuralgia[J]. *Life (Basel)*, 2024, 14(3):355.
- [6] CRUCCU G, FINNERUP N B, JENSEN T S, et al. Trigeminal neuralgia: new classification and diagnostic grading for practice and research[J]. *Neurology*, 2016, 87(2):220-228.
- [7] MAARBJERG S, GOZALOV A, OLESEN J, et al. Trigeminal neuralgia: a prospective systematic study of clinical characteristics in 158 patients[J]. *Headache*, 2014, 54(10):1574-1582.
- [8] KIKUCHI A, ISHIZAKI S, YOKOSAKO S, et al. Clinical features of herpes simplex virus reactivation after microvascular decompression for trigeminal neuralgia: experience of 200 patients and a literature review[J]. *Sur Neurol Int*, 2022, 13:317.
- [9] BENDTSEN L, ZAKRZEWSKA J M, AB-BOTT J, et al. European academy of neurology guideline on trigeminal neuralgia[J]. *Eur J Neurol*, 2019, 26(6):831-849.
- [10] THORNTON T, XIA S, ZUNIGA R J, et al. Utility of MR neurography for the evaluation of peripheral trigeminal neuropathies in the postoperative period[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2024, 45(4):525-531.
- [11] STEFANO D G, YUAN J, CRUCCU G, et al. Familial trigeminal neuralgia: a systematic clinical study with a genomic screen of the neuronal electrogenisome[J]. *Cephalalgia*, 2020, 40(8):767-777.
- [12] LEAL P R, HERMIER M, SOUZA M A, et al. Visualization of vascular compression of the trigeminal nerve with high-resolution 3T MRI: a prospective study comparing preoperative imaging analysis to surgical findings in 40 consecutive patients who underwent microvascular decompression for trigeminal neuralgia[J]. *Neurosurgery*, 2011, 69(1):15-25.
- [13] LAMBRU G, LAGRATA S, LEVY A, et al. Trigeminal microvascular decompression for short-lasting unilateral neuralgiform headache attacks[J]. *Brain*, 2022, 145(8):2882-2893.
- [14] HIRAKAWA R, EL-BIZRI N, SHRYOCK C J, et al. Block of Na⁺ currents and suppression of action potentials in embryonic rat dorsal root

- ganglion neurons by ranolazine[J]. *Neuropharmacology*, 2012, 62(7):2251-2260.
- [15] SEPAS-MOGHADDAM A, ETEMAD A, PER-EIRA F, et al. CapsField: light field-based face and expression recognition in the wild using capsule routing[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2021, 30:2627-2642.
- [16] LIANG Y, ZHAO Q, HU Z, et al. Imaging the neural substrate of trigeminal neuralgia pain using deep learning[J]. *Front Hum Neurosci*, 2023, 17:1144159.
- [17] KLUCKERT J, HÖTKER M A, MUTTEN D R, et al. AI-based automated evaluation of image quality and protocol tailoring in patients undergoing MRI for suspected prostate cancer[J]. *Europ J Radiol*, 2024, 177:111581.
- [18] ALTAMIRANO M J, JIMENEZ-OLVERA M, MORENOJIMENEZ S, et al. Comparison of microvascular decompression, percutaneous radiofrequency rhizotomy, and stereotactic radiosurgery in the treatment of trigeminal neuralgia: a long term quasi-experimental study[J]. *Pain Practice*, 2023, 24(3):514-524.
- [19] MULFORD K L, MOEN S L, GRANDE A W, et al. Identifying symptomatic trigeminal nerves from MRI in a cohort of trigeminal neuralgia patients using radiomics[J]. *Neuroradiology*, 2022, 64(3):603-609.
- [20] KORWISI B, BARKE A, TREEDE R D. Evidence-and consensus-based adaption of the IASP complex regional pain syndrome diagnostic criteria to the ICD-11 category of chronic primary pain: a successful cooperation of the IASP with the World Health Organization[J]. *Pain*, 2021, 162(9):2313-2314.
- [21] 任玉娥, 刘小会, 程志祥, 等. 经皮球囊压迫术治疗三叉神经痛中国专家共识(2022 版)[J]. *中华疼痛学杂志*, 2022, 18(4):437-448.
- [22] BENDELLA Z, PURRER V, HAASE R, et al. Brain and ventricle volume alterations in idiopathic normal pressure hydrocephalus determined by artificial intelligence-based MRI volumetry[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(13):1422.
- [23] FU F, WEI J, ZHANG M, et al. Rapid vessel segmentation and reconstruction of head and neck angiograms using 3D convolutional neural network[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1):4829.
- [24] CHANG Y J, MAKARY S M. Evolving and novel applications of artificial intelligence in thoracic imaging[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(13):1456.
- [25] 杨立环, 周文静, 闫润红. 基于数据挖掘和网络药理学分析三叉神经痛用药规律及作用机制[J]. *中医临床研究*, 2022, 14(36):1-8.
- [26] BÜCKER M, HOTI K, ROSE O. Artificial intelligence to assist decision-making on pharmacotherapy: a feasibility study[J]. *Explor Res Clin Soc Pharm*, 2024, 15:100491.
- [27] ALBITAR L, MAHDIAN M. The long journey to set up artificial intelligence (AI) data for automatic detection and localization of missed mesial-buccal (MB2) canals in endodontically-treated maxillary molars with cone beam computed tomography[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*, 2022, 134(3):e80.
- [28] CASCELLA M, SCHIAVO D, CUOMO A, et al. Artificial intelligence for automatic pain assessment: research methods and perspectives[J]. *Pain Res Manag*, 2023, 2023:6018736.
- [29] 罗正, 杨汉丰. 三叉神经成像及深度学习应用研究进展[J]. *影像研究与医学应用*, 2022, 6(24):1-4.
- [30] PARK I, PARK J H, YOON J, et al. Machine learning model of facial expression outperforms models using analgesia nociception index and vital signs to predict postoperative pain intensity: a pilot study[J]. *Korean J Anesthesiol*, 2024, 77(2):195-204.
- [31] LATYPOV T H, SO M C, HUNG P S, et al. Brain imaging signatures of neuropathic facial pain derived by artificial intelligence[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1):10699.
- [32] SEGHIER M L. 7 T and beyond: toward a synergy between fMRI-based presurgical mapping at ultrahigh magnetic fields, AI, and robotic neurosurgery[J]. *Eur Radiol Exp*, 2024, 8(1):73.
- [33] WIKBERG E, ESSEN M V, RYDÉN T, et al. Improvements of 177Lu SPECT images from sparsely acquired projections by reconstruction with deep-learning-generated synthetic projec-

- tions[J]. *EJNMMI Physics*, 2024, 11(1):53.
- [34] HOSSEINI F, ASADI F, RABIEI R, et al. Applications of artificial intelligence in diagnosis of uncommon cystoid macular edema using optical coherence tomography imaging: a systematic review[J]. *Surv Ophthalmol*, 2024, 69(6): 937-944.
- [35] HUO J, YU Y, LIN W, et al. Application of AI in in multilevel pain assessment using facial images: systematic review and meta-analysis[J]. *J Med Inter Res*, 2024, 26: e51250.
- [36] MARCO C, DANIELA S, ARTURO C, et al. Artificial intelligence for automatic pain assessment: research methods and perspectives[J]. *Pain Res Manag*, 2023, 2023: 6018736.
- [37] JACOBS S M. Psychological Factors influencing chronic pain and the impact of litigation [J]. *Curr Phys Med Rehab Rep*, 2013, 1(2): 135-141.
- [38] OBERMANN M, HOLLE D, NAGEL S. Functional neuroimaging in trigeminal autonomic cephalalgias [J]. *Ann Indian Acad Neurol*, 2018, 21(Suppl. 1): 51-56
- [39] EL-TALLAWY S N, PERGOLIZZI J V, VASILIU-FELTES I, et al. Incorporation of “Artificial Intelligence” for objective pain assessment: a comprehensive review[J]. *Pain Ther*, 2024, 13(3): 293-317.
- [40] BARGSHADY G, ZHOU X, DEO R C, et al. The modeling of human facial pain intensity based on Temporal Convolutional Networks trained with video frames in HSV color space [J]. *Appl Soft Comput J*, 2020, 97: 106805.
- [41] BENDTSEN L, ZAKRZEWSKA J M, ABBOTT J, et al. European Academy of Neurology guideline on trigeminal neuralgia [J]. *Eur J Neurol*, 2019, 26(6): 831-849.
- [42] HWANG H J, PARK K C, KANG B S, et al. Deep learning super-resolution technique based on magnetic resonance imaging for application of image-guided diagnosis and surgery of trigeminal neuralgia [J]. *Life (Basel)*, 2024, 14(3): 355.
- [43] AROMIWURA A A, CAVALCANT E L J, KWONG Y R, et al. The role of artificial intelligence in cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2024, 86: 13-25.
- [44] KOMASAWA N. Revitalizing postoperative pain management in enhanced recovery after surgery via inter-departmental collaboration toward precision medicine: a narrative review[J]. *Cureus*, 2024, 16(4): e59031
- [45] SHIMIZU M, IMAI H, KAGOSHIMA K, et al. Detection of compression vessels in trigeminal neuralgia by surface-rendering three-dimensional reconstruction of 1.5- and 3.0-T magnetic resonance imaging[J]. *World Neurosurg*, 2013, 80(3/4): 378-385.
- [46] ZHONG J, CHEN D Q, HUNG P S, et al. Multivariate pattern classification of brain white matter connectivity predicts classic trigeminal neuralgia[J]. *Pain*, 2018, 159(10): 2076-2087.
- [47] CHEN D Q, ZHONG J, CHU P P W, et al. Trigeminal neuralgia diffusivities using gaussian process classification and merged group tractography[J]. *Pain*, 2020, 162(2): 361-371.
- [48] HUO J, YU Y, LIN W, et al. Correction: application of AI in multilevel pain assessment using facial images: systematic review and meta-analysis[J]. *J Med Internet Res*, 2024, 17: 26.
- [49] BIGGIO M, CALIGIORE D, D'ANTONI F, et al. Machine learning for exploring neurophysiological functionality in multiple sclerosis based on trigeminal and hand blink reflexes[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 21078.

(收稿日期: 2024-03-27 修回日期: 2024-09-22)

(编辑: 管佩钰)