



• 特约综述 •

人工智能在超声引导神经阻滞方面的研究进展 *

陈子明¹ 聂锦平¹ 朱梦叶^{1,2} 张学学^{1,2} 张达颖^{1,2 Δ} 顾丽丽^{1,2 Δ}

(¹ 南昌大学第一附属医院疼痛科, 南昌 330006; ² 江西省卫生健康委员会神经性疼痛重点实验室, 南昌 330006)

摘要 超声成像为神经阻滞技术提供了可视化视野, 极大提高了神经阻滞的精准性和安全性。但是超声成像具有高度可变性和操作者依赖性, 为超声引导神经阻滞的发展和推广带来一定的挑战。人工智能在医学超声领域具有极大的发展前景, 基于人工智能的系统对超声图像进行处理、分类和分割, 可以实现对目标结构的自动识别, 对关键解剖结构的实时定位, 从而帮助临床医师弥补在解剖学理论和超声成像解读方面的不足, 进一步缩短超声引导下神经阻滞的学习曲线, 提高神经阻滞的准确性, 促进神经阻滞技术的发展和推广应用, 更好地服务于临床诊疗中。本文将综述 AI 在超声引导神经阻滞的研究进展, 以期对 AI 应用于临床超声引导神经阻滞技术的推广带来一些思考。

关键词 人工智能; 超声成像; 神经阻滞

The research progress of artificial intelligence in ultrasound-guided nerve block *

CHEN Ziming¹, NIE Jinping¹, ZHU Mengye^{1,2}, ZHANG Xuexue^{1,2}, ZHANG Daying^{1,2 Δ}, GU Lili^{1,2 Δ}

(¹ Department of Pain Medicine, The First Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330006, China;

² Key Laboratory of Neuropathic Pain (the First Affiliated Hospital of Nanchang University), Healthcare Commission of Jiangxi Province, Nanchang 330006, China)

Abstract A visualization was provided by ultrasound imaging for nerve block, that significantly enhance its accuracy and safety. But there are challenges for the evolution and promotion of ultrasound-guided nerve block because ultrasound imaging has high variability and operator dependency. Artificial intelligence (AI) has a great develop prospect in medical ultrasound field. Based-AI system can automatically identify the target structures and real-time locate the anatomical structures by disposing, classifying and segmenting for ultrasound images, that help clinicians make up for the deficiency in anatomical theory and interpretation of ultrasound imaging, further decrease the learning curve of ultrasound-guided nerve block, that can improve the accuracy of nerve block and promote this technology to develop and popularize for better service to clinic practice. We review the current research progress of AI apply to ultrasound-guided nerve block, expecting to get some thoughts for promoting AI apply to clinic ultrasound-guided nerve block.

Keywords artificial intelligence; ultrasound imaging; nerve block

神经阻滞 (nerve block, NB) 是通过各种物理及化学方法作用于神经节、根、丛、干和神经末梢, 使其传导功能暂时或永久被阻断的技术^[1], 广泛用于慢性疼痛性疾病临床诊疗和区域麻醉中。近年来, 随着超声可视化的发展和普及, 超声大大提高了神经阻滞的精准性和安全性。曾宪政等^[2]研究表明, 超声引导下经颈椎间孔注射可以达到经 CT 引

导相似的准确性, 且穿刺时间更短, 安全性更高。但超声引导的神经阻滞技术也存在一些不足, 超声的成像质量与操作者的水平差异、超声设备的差异及病人的解剖结构变异等因素密切相关。鉴于解剖结构的复杂性、超声图像的多变性和操作者依赖性, 对于从未接受超声训练的临床医师可能要经历一个漫长、系统的培训过程, 因此阻碍了该项技术的进

* 基金项目: 江西省科技厅重点研发计划一般项目 (S2020ZPYFB2343); 江西省卫生健康委科技计划项目 (202130296); 国家重点研发计划“主动健康和人口老龄化科技应对重点专项” (2022YFC3602202)

Δ 通信作者 张达颖 zdysino@163.com; 顾丽丽 gl2009cn@aliyun.com



一步普及化。

人工智能 (artificial intelligence, AI) 于 1956 年首次提出, 发展至今已有 60 余年的历史。由于图像的像素值可以量化, 图像可以成为 AI 算法的主要数据来源, 因此 AI 技术非常适合图像的识别^[3]。AI 用于超声医学是现在的研究热点, 在超声诊断方面已经取得较大的进展, 尤其在肝脏、心血管、甲状腺、乳腺、肌肉骨骼 (肌骨) 系统等领域中^[4], 同样在神经阻滞领域也正受到越来越多的关注。国外的研究主要在 AI 用于超声图像自动识别与解读^[5]、穿刺针可视化技术的优化以及学员培训等方面, 但国内未见类似的报道。为进一步提高超声引导神经阻滞技术的精准性和普及性, 我们可以利用 AI 技术辅助进行超声图像解读及穿刺路径优化。本文综述了 AI 在该领域目前的研究进展, 以期对 AI 应用于临床超声引导神经阻滞技术的推广带来一些思考。

一、人工智能的概述与超声成像

AI 属于计算机科学的分支, 主要通过计算机来模拟人类的思维及认知功能, 产生与人相似的思维方式, 从而提升学习和解决问题的能力。常见的 AI 技术包括机器学习 (machine learning, ML)、深度学习 (deep learning, DL) 和卷积神经网络 (convolution neural networks, CNNs) 等^[6]。ML 是 AI 的一个子类, 通过算法将输入数据映射到输出结果^[7]。ML 通过手动提取特征, 应用算法建立输入图像特征与输出结果之间的对应关系, 即可实现自动化的推理过程。DL 是在人工神经网络的基础上增加隐藏层, 实现对输入数据更多元的处理。DL 具有自动特征学习能力、高性能的推理能力等优势, 无需人为提取特征或预处理图像, 可以自动对数据信息进行学习, 并从原始数据中积累经验反馈到新的学习中。DL 作为 AI 的重要分支领域之一, 可用于高质量的超声图像获取和解读, 并提供客观、准确的超声图像分析^[8], 在肌骨超声中的应用受到了广泛的关注。CNNs 是神经网络的一个子类, DL 的应用中大多数是基于 CNNs。CNNs 由一系列隐藏层组成, 包含卷积层、池化层、全连接层等多个层次^[9]。CNNs 输入的数据类型为图像, 在处理医学成像方面具有高效的特点^[7], 研究已证实 CNNs 具有学习医学影像分层和抽象特征的能力^[10]。综上所述, AI 技术在超声医学领域大有可为。

二、人工智能在超声引导神经阻滞方面的应用

超声成像存在的空间分辨率低, 散斑噪声等问题, 会导致细微的解剖特征通过肉眼无法与周围背景明显区分, 尤其是仅接受过有限的超声图像阅读

训练的临床医师在解读超声图像时会面临着很大的挑战^[11]。同时, 对于部位较深的阻滞靶点, 超声成像质量欠佳可能导致穿刺针的不能清晰显影, 这种情况下盲目进针可能增加并发症的发生率。AI 具有强大的图像处理能力及数据分析能力, 通过采集大量图像数据, 提取图像特征, 构建一系列高效的学习模型, 对图像结构进行自动地分类、分割和识别, 辅助临床医师对超声图像的快速准确解读。对于缺乏系统超声培训的临床医师, 基于 AI 的超声系统可以提供更多的补充信息, 降低认知负荷, 扫清图像的阅读障碍, 从而提高超声图像的解读效率。AI 引导的超声成像可以对图像进行更有效和客观的评估, 减少操作者主观因素的影响, AI 相关的计算机软件可以提高临床工作的精度、性能和时间效率, 同时通过最小化人为干预来降低成本投入^[12], 因此不论是在临床实践中, 还是在学员培训方面都有巨大的潜力。目前基于 AI 的超声引导神经阻滞技术的研究在以下方面取得了一定的进展。

1. 人工智能对神经超声图像的自动分割和识别

超声的引导可以帮助操作者在穿刺过程中避免损伤血管、神经等重要组织, 提高神经阻滞的安全性。为达到更好的神经阻滞效果, 阻滞点需要接近目标神经。但是超声图像复杂多变, 准确定位并识别目标神经对于初学者而言绝非易事。基于 AI 的超声成像系统可以根据像素值不同实现对图像进行自动分割, 从而识别出目标神经, 降低操作者对目标神经的解读误差, 进而提高神经阻滞的准确性。Hafiane 等^[13]使用基于相位的概率梯度矢量流 (probabilistic gradient vector flow, PGVF) 算法跟踪坐骨神经区域, 生成的平均 Dice 度量值为 0.90, 平均 Hausdorff 度量值为 11.1, 显示该方法的神经识别具有较高的准确性。Hadjerci 等^[14]提出了一种分割系统, 包括预处理、特征提取和支持向量机分类器, 用于选择正中神经的多个目标, 并使用置信度决策最终确定正中神经的真实目标。该方法生成的平均 Dice 度量值为 0.815。Alkhatib 等^[15]提出了利用自适应中值二进制模式 (adaptive median binary pattern, AMBP) 作为一种跟踪算法对正中神经的纹理特征进行分割和追踪, 发现其准确率为 95%。

U-Net 是一种基于完全卷积网络的架构, 广泛应用于生物学医学图像分割。将输入图像进行多层卷积, 提取出若干个特征, 然后对这些特征进行反卷积, 并将卷积图像添加到浅层以获得目标特征和位置信息, 最后以图像的形式输出^[16]。Smistad 等^[17]已经尝试用 U-Net 来突出神经和血管, 用于超声引



导的腋路臂丛神经阻滞。Huang 等^[16]利用 U-Net 训练一个用于股神经区域分割的模型,取得了较好的分割效果。另一种 DL 算法是 MaskTrack,它是一种递归神经网络结构,可以有效分割序列图像中的对象,并准确定位神经区域^[18]。Horng 等^[19]开发一个基于 U-Net 架构的 CNN 正中神经分割和定位模型,称为 DeepNerve。DeepNerve 使用了 MaskTrack 技术来增强定位能力和 ConvLSTM 来记录之前的信息并加强分割。此研究比较了 4 种不同的深度学习模型,分别为轻量级 U-net、U-net + MaskTrack、ConvLSTM + U-net + MaskTrack 和 DeepNerve,发现四个模型中 DeepNerve 的正中神经分割效果最好。同时,将实验结果与基于活动轮廓模型的其他常规方法进行了比较,发现 DeepNerve 的分割效果优于传统的主动轮廓方法。上述研究表明 AI 具有很强的超声图像神经分割能力,自动识别神经的应用潜力巨大。

2. 人工智能对脊柱超声图像的自动识别和定位

对于脊神经的阻滞需要对脊柱进行准确定位,传统的触诊定位法在临床实际运用中较为常见。准确地触诊定位需要良好的解剖学知识和一定的技巧,但是肥胖、脊柱变异和脊椎手术后等因素会加大定位的难度,盲目穿刺会增加相应并发症发生的概率。研究表明,传统的触诊法对脊柱节段识别的准确率只有 30%^[20]。超声的引导可以获得清晰的脊柱部位解剖成像,实现对脊柱结构的可视化识别,对脊柱的定位无疑更为精准。但是,由于脊柱解剖结构具有复杂性,超声图像解读往往具有很高的难度,并且图像还常常受到散斑噪声、声杂波、混响伪影等的影响。AI 技术可以对超声图像进行降噪、去伪影等处理,优化图像质量,精准特征提取,实现对超声图像的自动分类和识别,指导医师对超声图像的精准解读,从而实现超声引导对脊柱水平的自动识别和定位。Kerby 等^[21]提出利用旁中位图获得的全景图像自动标记腰部水平。Yu 等^[22]开发了一种图像处理和识别程序,用于自动解读横向视图中的超声图像。其开发了一种四层级联分类器来分类棘间图像和骨图像,在孕妇的超声图像上,训练集的成功率为 94.8%,测试集的成功率为 93.23%。Yu 等^[23]还利用一种基于特征提取和 ML 的方法,用于自动判读脊柱横断面上的超声图像。通过对来自 20 名孕妇的 800 幅图像进行训练,对来自 16 名孕妇的 640 幅图像进行测试。该方法在训练集和测试集上的成功率分别为 97.25% 和 95.00%。Pesteie 等^[24]提出了 ML 特征提取和神经网络分类技术来自

动识别硬膜外和关节突关节注射的最佳平面。Hetherington 等^[25]开发出一种实时脊柱水平自动定位系统,通过深度卷积神经网络 (deep convolution neural network, DCNN) 对脊柱下部的横向图像进行分类,在不需要预定义特征的情况下,利用迁移学习和 4 个不同的 DCNN 架构来完成学习脊柱的特征。该系统可以对序列的超声数据进行自动分类和处理,能够识别出骶骨、椎间隙、椎体骨平面之间的过渡从而识别椎体水平,其自动识别成功率分别为 95%、93% 和 93%。在 20 次超声扫描中有 17 次成功识别了所有的椎体水平,达到了 88% 的精度。未来的研究将纳入更多的数据,以提高训练模型的准确性,同时将算法扩展到整个脊柱以提高临床适用性。

3. 人工智能对穿刺针超声图像的自动检测和定位

神经阻滞的准确性与穿刺针尖和目标神经的距离密切相关。超声引导下穿刺可以实时动态观察进针的情况,但由于受伪影和图像质量的影响,可能出现针显影不佳的情况,无法准确判断针尖的位置。在超声引导穿刺过程中,穿刺针的角度过于陡峭或插入过深时,穿刺针在超声成像平面的显影就会欠佳,降低了针的能见度。而且,沿针轨的高回声软组织或骨产生的高强度特征也可能干扰针的可见性^[26]。因此,在面对穿刺角度过大和穿刺过深等情况时,准确地针尖定位仍然是一个挑战。AI 技术可以对超声图像的针影进行自动分割,强化针与背景的区别,有助于增强针的可视化,提高定位精度。并且基于 AI 对超声图像进行处理的方法不需要额外的硬件,更容易适应标准的临床工作流程。Ding 等^[27]提出了基于 Hough 变换的方法可以实时分割针影。Mwikirize 等^[28]提出了一种基于局部相位投影和图像正则化的框架以加强针轴和针尖的可视性。利用该方法在猪和牛的模型上进行了 300 次体外超声扫描,结果显示针尖定位误差为 0.55 ± 0.06 mm。Hatt 等^[29]介绍了一种基于 ML 的方法,使用一种统计增强方法来训练针状分割的像素级分类器,用于超声图像的分割。该研究对离体标本和临床神经阻滞两方面的数据进行验证,对于体外数据集,成功定位针的概率为 86.2%,平均定位误差为 0.48 mm;对于临床数据集,成功定位针的概率为 99.8%,平均定位误差为 0.19 mm。结果表明,基于 ML 的分割方法提高了针的定位精度,增强了针的可视化。近年来基于 CNNs 的 DL 的开始出现,并迅速成为一种强大的医学图像分析工具。Mwikirize 等^[26]利用一个全卷积网络 (fully convolutional network, FCN) 和

一个快速的基于区域的卷积神经网络 (region based convolutional neural network, R-CNN) 组成的框架, 对穿刺针轨迹及针尖进行全自动定位。经过 2500 次体外超声扫描的训练和验证, 该检测系统检测精度为 99.6%, 召回率为 99.78%; 在牛和猪腰骶椎体模型上, 使用不同成像平面收集的 400 个图像, 对针定位进行验证, 得到针轴部定位误差为 $0.82^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$, 针尖定位误差为 0.23 ± 0.05 mm, 总处理时间为 0.58 s, 说明该框架下全自动的穿刺针检测 and 定位在超声引导微创治疗和手术中可能具有广阔的应用前景。

4. 人工智能实时辅助超声引导神经阻滞的运用

超声图像不能显示完整轮廓, 操作者必须依靠周围的组织、解剖学知识和经验在超声图像中勾画解剖结构。ML 技术可能是一种提高分割准确性的方法, 但是并不能满足实时动态的超声辅助。DL 具有自主学习能力, 可以更好地适应临床运用。Smistad 等^[30] 创建了一个实时辅助系统, 指导操作者执行超声引导的股神经阻滞。研究通过比较估计目标和专家建议的目标之间距离, 结果显示平均距离为 8.5 mm, 标准差为 2.5 mm, 证实该系统有助于初学者实施神经阻滞时识别图像结构, 但是对图像质量有较高的要求。Gungor 等^[31] 为评估基于 AI 的超声的准确性, 开发了一款软件用于超声引导周围神经阻滞的图像解释。在软件引导下进行斜角肌间沟、锁骨上、锁骨下和腹横肌平面进行超声扫描, 软件会对预先设定的解剖标志 (如血管、肌肉、骨等) 进行颜色标记 (见图 1), 同时原始和标记的超声图像都被保存, 并由专家对软件识别原始结构的准确程度进行评价。结果表明, 基于 AI 的超声实时解剖识别具有较高的准确性。基于 AI 支持的超声成像可能成为一种很有前途的辅助工具, 用于辅助新学员识别超声图像中解剖结构, 实施周围神经阻滞,

有利于培训学员和提高经验。Bowness 等^[32] 探讨基于 AI 的超声设备 ScanNav 在临床的实用性, 由专家组和非专家组均用 AI 超声与普通超声进行扫查相比较, 结果显示非专家组对 ScanNav 能提供培训潜力的积极反馈为 61.7% (37/60), 专家组对 ScanNav 在教学中的实用性的积极反馈为 50% (30/60), 说明 ScanNav 可以支持非专家的培训和临床实践, 也有利于专家对超声引导神经阻滞的教学, 基于 AI 增强的超声扫描能够支持未来超声引导技术的发展和推广。

三、总结与展望

几十年来, 超声因其高安全性和高效率在临床诊疗中得到了广泛的应用。随着计算能力和算法的创新, 还出现了一些提高空间分辨率和图像质量的新功能, 如散斑减少、视频捕获、谐波组织成像、复合成像和全景成像^[33], 极大地弥补了超声成像质量的不足。AI 技术为超声引导带来更大的潜能, 对于初学者而言, AI 技术的辅助可以降低学习超声引导神经阻滞的上手难度, 缩短学习曲线, 可以将其演变成一个重要的教育资源, 促进临床技能的培训, 从而促进超声引导神经阻滞技术在临床的应用推广。在临床操作中, 基于 AI 的系统可以辅助临床医师做出判断, 减少图像采集、定位、分析及决策进针入路等所需的时间, 极大提高工作效率, 提高操作医师的自信心。同时长时间地阅读图像容易产生疲劳, 可能会降低操作医师判断力, 而计算机化的系统不受疲劳的影响, 能够高保真度重复执行指令^[34], 从而降低个人因素的影响。对于城乡间医疗资源不平衡的问题, 基于 AI 的超声成像系统有助于打破医疗技术屏障, 促进超声引导神经阻滞技术的推广, 进一步促进医疗公平。由此可见, 基于 AI 的超声引导神经阻滞技术在临床运用中具有广阔的前景和应用价值。

尽管 AI 在克服超声图像高度可变性和操作者

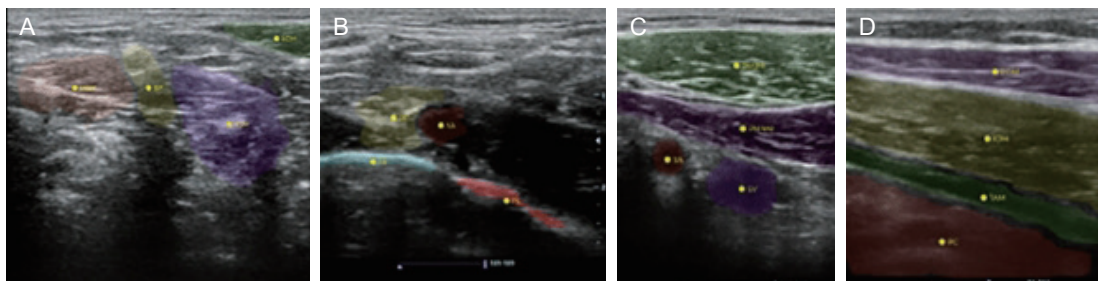


图 1 软件用于超声图

斜角肌间沟臂丛阻滞 (A)、锁骨上臂丛阻滞 (B)、锁骨下臂丛阻滞 (C) 和腹横肌平面 (TAP) 的 AI 超声图像 (D), 使用颜色标记对预定义的解剖标志进行预测 (引自参考文献^[32])



依赖性方面显示了巨大的潜力,但我们仍然面对着很多挑战。首先,图像预处理技术需要大规模应用AI以适应解剖结构的复杂性和超声图像的多变性,缺乏医学背景的工程师无法单独完成这一任务,这对医学和计算机科学的学科间合作提出更高的要求。其次,数据是AI学习系统最核心、最关键的组成部分,数据库的数量和质量将直接影响AI的性能,因此基于AI的学习依赖于大规模、标准化的超声图像数据的采集。临床工作中的超声图像采集可以为AI的发展提供丰富资源,但人工采集和评价时存在个人主观上的偏差,不可避免地产生偏倚。如何建立一个超声图像处理和采集的标准,避免数据采集过程中的偏倚也是当前面临的重要问题。第三,AI算法缺乏透明度,我们无法知道输入层和输出层之间的多个隐含层的内部结构,如果算法的隐含层存在错误,则无法知道是哪一层,使得问题的解决方案难以找到^[35]。综上所述,AI运用于实际工作中还面临着诸多的挑战和难题。

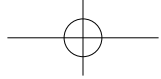
我们相信,随着优化超声成像的AI相关技术的不断发展,其在加强解剖结构的识别和定位、增强穿刺针的可视化等辅助神经阻滞方面也将进一步成熟,从而可以更好地为临床医师提供实时定位和决策支持。相信在未来,基于AI的超声会更好地促进神经阻滞的推广和应用。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

参 考 文 献

- [1] 陈雪飘,左明明,刘金锋.超声引导技术在三叉神经阻滞中的应用[J].中国疼痛医学杂志,2017,23(8):598-601.
- [2] 曾宪政,宋莉,肖红,等.超声引导下颈椎椎间孔注射治疗神经根型颈椎病的临床研究[J].中国疼痛医学杂志,2021,27(3):182-187.
- [3] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553):436-444.
- [4] Akkus Z, Cai J, Boonrod A, *et al.* A survey of deep-learning applications in ultrasound: artificial intelligence-powered ultrasound for improving clinical workflow[J]. J Am Coll Radiol, 2019, 16(9 Pt B):1318-1328.
- [5] Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine[J]. Minim Invasive Ther Allied Technol, 2019, 28(2):73-81.
- [6] Shen YT, Chen L, Yue WW, *et al.* Artificial intelligence in ultrasound[J]. Eur J Radiol, 2021, 139:109717.
- [7] Goldenberg SL, Nir G, Salcudean SE. A new era: artificial intelligence and machine learning in prostate cancer[J]. Nat Rev Urol, 2019, 16(7):391-403.
- [8] Liu SF, Wang Y, Yang X, *et al.* Deep learning in medical ultrasound analysis: a review[J]. Engineering, 2019, 5(2):261-275.
- [9] Shin Y, Yang J, Lee YH, *et al.* Artificial intelligence in musculoskeletal ultrasound imaging[J]. Ultrasonography, 2021, 40(1):30-44.
- [10] Soffer S, Ben-Cohen A, Shimon O, *et al.* Convolutional neural networks for radiologic images: a Radiologist's guide[J]. Radiology, 2019, 290(3):590-606.
- [11] Noble JA, Navab N, Becher H. Ultrasonic image analysis and image-guided interventions[J]. Interface Focus, 2011, 1(4):673-685.
- [12] Hamet P, Tremblay J. Artificial intelligence in medicine[J]. Metabolism, 2017, 69S:S36-S40.
- [13] Hafiane A, Vieyres P, Delbos A. Phase-based probabilistic active contour for nerve detection in ultrasound images for regional anesthesia[J]. Comput Biol Med, 2014, 52:88-95.
- [14] Hadjerici O, Hafiane A, Conte D, *et al.* Computer-aided detection system for nerve identification using ultrasound images: a comparative study[J]. Informatics Med Unlocked, 2016, 3:29-43.
- [15] Alkhatib M, Hafiane A, Tahri O, *et al.* Adaptive median binary patterns for fully automatic nerves tracking in ultrasound images[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2018, 160:129-140.
- [16] Huang C, Zhou Y, Tan W, *et al.* Applying deep learning in recognizing the femoral nerve block region on ultrasound images[J]. Ann Transl Med, 2019, 7(18):453.
- [17] Smistad E, Johansen KF, Iversen DH, *et al.* Highlighting nerves and blood vessels for ultrasound-guided axillary nerve block procedures using neural networks[J]. J Med Imaging (Bellingham), 2018, 5(4):044004.
- [18] Chen LC, Papandreou G, Kokkinos I, *et al.* Deeplab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2018, 40(4):834-848.
- [19] Horng MH, Yang CW, Sun YN, *et al.* Deepnerve: a new convolutional neural network for the localization and segmentation of the median nerve in ultrasound image sequences[J]. Ultrasound Med Biol, 2020, 46(9):2439-2452.
- [20] Furness G, Reilly MP, Kuchi S. An evaluation of ultrasound imaging for identification of lumbar intervertebral level[J]. Anaesthesia, 2002, 57(3):277-280.
- [21] Kerby B, Rohling R, Nair V, *et al.* Automatic identification of lumbar level with ultrasound[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2008, 2008:2980-2983.
- [22] Yu S, Tan KK, Sng BL, *et al.* Automatic identification of needle insertion site in epidural anesthesia with a cascading classifier[J]. Ultrasound Med Biol, 2014, 40(9):1980-1990.

(下转第 816 页)



- 型的建立及模型维持时间观察 [J]. 中国实验动物学报, 2017, 25(5):494-499.
- [14] Strowig T, Henao-Mejia J, Elinav E, *et al.* Inflammasomes in health and disease[J]. *Nature*, 2012, 481(7381):278-286.
- [15] 蔺娜, 徐丽萍, 宋欣伟. 痛风性关节炎血清炎症因子水平与骨代谢标志物变化分析 [J]. 风湿病与关节炎, 2021, 10(11):17-19, 42.
- [16] Pope RM, Tschopp J. The role of interleukin-1 and the inflammasome in gout: implications for therapy[J]. *Arthritis Rheum*, 2007, 56:3183-3188.
- [17] 贺维, 龙婷, 张艺馨, 等. NLRP3 炎性小体在慢性偏头痛小鼠三叉神经脊束尾核的表达及作用 [J]. 中国疼痛医学杂志, 2020, 26(7):490-495.
- [18] Siebert S, Tsoukas A, Robertson J, *et al.* Cytokines as therapeutic targets in rheumatoid arthritis and other inflammatory diseases[J]. *Pharmacol Rev*, 2015, 67:280-309.
- [19] Goldberg EL, Asher JL, Molony RD, *et al.* β -Hydroxybutyrate deactivates neutrophil NLRP3 inflammasome to relieve gout flares[J]. *Cell Rep*, 2017, 18(9):2077-2087.
- [20] Brennan FM, McInnes IB. Evidence that cytokines play a role in rheumatoid arthritis[J]. *J Clin Invest*, 2008, 118(11):3537-3545.
- [21] 林璐璐, 石广霞, 屠建锋, 等. 膝骨关节炎疼痛机制研究进展 [J]. 中国疼痛医学杂志, 2022, 28(6):454-459.
- [22] Zheng J, Yao L, Zhou Y, *et al.* A novel function of NLRP3 independent of inflammasome as a key transcription factor of IL-33 in epithelial cells of atopic dermatitis[J]. *Cell Death Dis*, 2021, 12(10):871.
- [23] Bakhshi S, Shamsi S. MCC950 in the treatment of NLRP3-mediated inflammatory diseases: latest evidence and therapeutic outcomes[J]. *Int Immunopharmacol*, 2022, 106(5):108595-108605.
- [24] 李珊珊. 非布司他治疗痛风性关节炎对病人血沉水平、尿酸水平及安全性的影响分析 [J]. 现代诊断与治疗, 2021, 32(22):3550-3551.
- [25] Wang X, Wang YG. Progress in treatment of gout using Chinese and western medicine[J]. *Chin J Integr Med*, 2020, 26(1):8-13.

(上接第809页)

- [23] Yu S, Tan KK, Sng BL, *et al.* Lumbar ultrasound image feature extraction and classification with support vector machine[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2015, 41(10):2677-2689.
- [24] Pesteie M, Abolmaesumi P, Ashab HA, *et al.* Real-time ultrasound image classification for spine anesthesia using local directional Hadamard features[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2015, 10(6):901-912.
- [25] Hetherington J, Lessoway V, Gunka V, *et al.* SLIDE: automatic spine level identification system using a deep convolutional neural network[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(7):1189-1198.
- [26] Mwikirize C, Noshier JL, Hacıhaliloglu I. Convolution neural networks for real-time needle detection and localization in 2D ultrasound[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2018, 13(5):647-657.
- [27] Ding M, Fenster A. A real-time biopsy needle segmentation technique using Hough transform[J]. *Med Phys*, 2003, 30(8):2222-2233.
- [28] Mwikirize C, Noshier JL, Hacıhaliloglu I. Signal attenuation maps for needle enhancement and localization in 2D ultrasound[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2018, 13(3):363-374.
- [29] Hatt CR, Ng G, Parthasarathy V. Enhanced needle localization in ultrasound using beam steering and learning-based segmentation[J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2015, 41:46-54.
- [30] Smistad E, Iversen DH, Leidig L, *et al.* Automatic segmentation and probe guidance for real-time assistance of ultrasound-guided femoral nerve blocks[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2017, 43(1):218-226.
- [31] Gungor I, Gunaydin B, Oktar SO, *et al.* A real-time anatomy identification via tool based on artificial intelligence for ultrasound-guided peripheral nerve block procedures: an accuracy study[J]. *J Anesth*, 2021, 35(4):591-594.
- [32] Bowness JS, El-Boghdadly K, Woodworth G, *et al.* Exploring the utility of assistive artificial intelligence for ultrasound scanning in regional anesthesia[J]. *Reg Anesth Pain Med*, 2022, 47(6):375-379.
- [33] Powers J, Kremkau F. Medical ultrasound systems[J]. *Interface Focus*, 2011, 1(4):477-489.
- [34] Connor CW. Artificial intelligence and machine learning in anesthesiology[J]. *Anesthesiology*, 2019, 131(6):1346-1359.
- [35] Wang F, Kaushal R, Khullar D. Should health care demand interpretable artificial intelligence or accept "black box" medicine?[J]. *Ann Intern Med*, 2020, 172(1):59-60.