

人工智能辅助超声图像增强在微小靶区识别中的应用前景展望

迟悦 孙成哲*

(吉林市化工医院 电诊科 132021)

【摘要】超声影像在微小靶区识别中受限于固有斑点噪声、低空间分辨率及有限对比度,传统方法难以突破物理瓶颈。人工智能,特别是深度学习技术,通过结构化斑点噪声抑制、超分辨率重建及对比度自适应增强,显著提升了微小靶区的边界清晰度与视觉突显性。噪声抑制与细节保留的权衡、模型泛化能力及实时性要求仍是当前主要挑战。未来,无监督学习、前端波束形成融合及多模态特征融合将推动技术向靶区自适应、物理可解释及系统级集成演进,重塑超声成像质量边界。

【关键词】人工智能; 超声图像增强; 微小靶区识别; 超分辨率重建; 斑点噪声抑制

Prospects for the Application of Artificial Intelligence-Assisted Ultrasound Image Enhancement in Micro-target Recognition by

Chi Yue Sun Chengzhe*

(Department of Electronic Diagnosis, Jilin Chemical Hospital 132021)

[Abstract] Ultrasonic imaging faces limitations in micro-target recognition due to inherent speckle noise, low spatial resolution, and limited contrast, making traditional methods unable to overcome these technical constraints. Artificial intelligence, particularly deep learning techniques, has significantly improved boundary clarity and visual prominence of micro-targets through structured speckle noise suppression, super-resolution reconstruction, and contrast adaptive enhancement. However, balancing noise suppression with detail preservation, ensuring model generalization capability, and meeting real-time performance requirements remain major challenges. Future advancements in unsupervised learning, front-end beamforming fusion, and multimodal feature integration will drive technological evolution toward target-specific adaptation, physical interpretability, and system-level integration, ultimately redefining the boundaries of ultrasound imaging quality.

[Key words] Artificial intelligence; Ultrasound image enhancement; Micro-target recognition; Super-resolution reconstruction; Spot noise suppression

引言

超声影像因其动态实时的成像特点,在临床筛查与介入治疗引导中发挥着作用^[1-2]。超声图像固有的斑点噪声、较低的空间分辨率以及有限的对比度敏感范围,一直是制约其诊断效能的根本瓶颈。这一内在限制在微小靶区的识别场景中尤为突出。当靶区尺寸接近或低于超声图像的物理分辨极限时,传统的亮度模式图像往往难以呈现足够清晰的边界轮廓与内部纹理特征,从而导致病灶漏检或误判。人工智能,特别是深度学习技术的介入,正在从信号采集端到图像重建端全面重塑超声成像的质量边界^[3-4]。通过构建复杂的神经网络模型,研究者能够实现对图像中噪声成分的结构化抑制,同时对有用信号的细节信息进行非线性增强,使得原本淹没在背景噪声中的微小靶区得以凸显。

1. 超声图像微小靶区识别的技术困境

1.1 斑点噪声对靶区视觉表征的干扰机制

超声成像的基本物理原理决定了斑点噪声是其内在属性。超声波长与组织微观结构的散射体产生相干干涉,在所成像区域中形成一种乘性噪声模式,即斑点。这种噪声并不服从高斯分布,也不具有各向同性的统计特征,因此传统的线性滤波方法难以在保持组织结构信息的同时有效将其去除。在微小靶区识别中,斑点噪声带来的问题尤为显著。微小靶区的尺寸通常仅有数个像素宽度,其回声强度可能与周围正常组织的背景斑点强度处于相近的量级。此时,视觉系统难以将靶区的真实信号与噪声点区分开来,导致靶区在图像中呈现为不确定的模糊团块,甚至完全融入背景纹理中。斑点噪声的存在降低了图像的信噪比,更重要的是破坏了靶区边界的视觉连续性,使得医师在主观阅片中缺乏明确的空间定位依据。

1.2 有限空间分辨率对小尺度结构成像的制约

超声图像的空间分辨率受到声波波长、换能器孔径以及波束形成算法的多重限制。虽然现代超声设备通过高频探头提升了轴向分辨率,但穿透深度与分辨率之间存在不可调和

的折中关系。对于位于深部组织的微小靶区,其超声回波信号在组织传播过程中经历了衰减与发散,导致最终图像中靶区的空间展宽大于其实际物理尺寸。这一问题在超分辨率重建技术出现之前长期被视作基于物理的固有障碍。当靶区尺寸接近甚至低于系统分辨率极限时,图像中呈现的不再是靶区的真实形态,而是由点扩散函数卷积后形成的模糊光斑。这种模糊效应使得微小靶区既无法被精确测量,也难以与相邻的正常解剖结构明确分离,从而严重限制了计算机辅助检测系统以及医师对早期微小病变的识别能力。

1.3 低对比度灵敏性导致的靶区视觉隐匿

超声成像中的灰阶对比度源自不同组织界面间的声阻抗差异。许多具有临床意义微小靶区的声学特征与周围正常组织仅有细微差别,导致其在亮度模式图像中呈现为近乎等回声的状态。传统超声设备的灰阶映射函数是全局性的,其动态范围有限。当一个低对比度的微小靶区存在于一个回声范围较为均匀的组织背景中时,系统难以在灰阶图像中赋予该靶区足以引起视觉注意的像素强度差异。在灰度级别有限且全局映射固定的显示器上,这类靶区往往处于接近背景的灰度区间,缺乏足够的视觉突显性。即便医师具备丰富的专业知识,在不借助图像后处理手段的情况下,仅依靠原始扫描图像也很难从等回声背景中将微小靶区可靠地识别出来。图像对比度的问题并非单纯的技术参数调整所能解决,因为它涉及到信号处理中动态压缩与细节呈现之间的根本性权衡。

2. 人工智能增强方法及其对识别瓶颈的回应

2.1 深度学习驱动的斑点噪声结构化抑制

传统的斑点噪声抑制方法,如中值滤波、各向异性扩散等,虽然在平滑噪声方面具有一定效果,但往往以牺牲图像的精细纹理与边缘信息为代价。深度学习方法的引入改变了这一局面。卷积神经网络通过多层非线性变换,能够从大量带噪声数据中学习斑点噪声的统计分布特征,从而实现噪声与信号的深度分离。生成对抗网络在此基础上进一步提升了去噪效果,其生成器负责产生去噪后的图像,而判别器则尝试区分生成的图像与理想的无噪声图像。通过这种博弈式的训练过程,网络能够学会在抑制噪声的同时最大限度保留图像的原始解剖结构细节。在微小靶区识别中,这种结构化的去噪策略有助于消除背景中的斑点干扰,使靶区边界的连续性得到恢复,并提高靶区内部纹理特征的可见度。与传统的全球滤波不同,基于深度学习的去噪模型能够实现空间自适应的处理方式,即对不同区域采取不同程度的平滑策略,从

而在噪声密集的区域实施较强的抑制,而在富含纹理信息的靶区边界附近保持锐利度。

2.2 超分辨率重建对空间分辨极限的突破

空间分辨率的提升是减少微小靶区漏检的关键环节。图像超分辨率重建技术旨在从低分辨率输入中恢复高分辨率的图像细节,其所面临的本质困难是一个高度病态的反问题,因为在单帧低分辨率图像中,丢失的高频信息存在多种可能的重建方式。早期的超分辨率方法依靠插值或稀疏表示来推测丢失的细节,但其恢复能力有限。近年来,基于深度学习的超分辨率方法展现出强大的细节生成能力。特别是以生成对抗网络为代表的模型,能够通过感知损失函数和对抗性训练,使重建图像在主观视觉效果上达到接近于真实高分辨率图像的感知质量。在超声成像这一特定场景中,超分辨率方法的有效性受到配对数据稀缺的制约。由于真实场景中难以获取同一组织的成对低分辨率和高分辨率图像,研究者转而采用循环一致性生成对抗网络等无监督方法来实现自监督的超分辨率重建。这类方法不依赖配对的训练数据,而是通过循环一致性约束确保重建图像在降采样后能够恢复到原始的低分辨率状态,从而在不需要参照标准的情况下实现质量的提升。对于微小靶区而言,超分辨率重建能够为其轮廓提供更多的高频细节,使原本因欠采样而模糊的边缘变得清晰可辨。

2.3 对比度自适应增强与靶区视觉突显

灰阶对比度的改善是提升微小靶区可见度的直接途径。传统的直方图均衡化等对比度拉伸方法虽然实现简单,但其处理是全局性的,可能同时放大了背景噪声的对比度,从而抵消了改善效果。相比之下,基于深度学习的对比度增强方法能够实现局部自适应的调整,即根据每一图像区域的灰度分布特征动态调整映射函数,使低对比度区域得到优先补偿。在目标检测任务中,注意力机制的引入进一步增强了模型对微小靶区的敏感度。注意力模块能够计算特征图中每个空间位置的权重响应,从而使网络的前向传播聚焦于那些最可能包含靶区信息的区域。这种机制提高了目标检测的准确性,也间接增强了图像增强过程中靶区特征的表征强度。当增强模型与注意力机制结合时,网络可以针对靶区的特征模式学习专属的增强策略,使靶区与背景之间的边界对比度得到针对性改善,而背景区域则维持自然的灰度过渡。多尺度特征融合技术在微小靶区增强中也扮演了关键角色。通过同时提取高分辨率的局部细节特征和低分辨率的全局上下文信息,模型能够在放大靶区信号的同时保持对整体解剖结构的一致性认知,避免因局部过度增强而产生的人造伪影。

3. 技术路径中的内在矛盾与约束

人工智能辅助超声图像增强方法在迈向临床应用的过程中面临着若干的内在矛盾。首要的挑战在于噪声抑制与细节保留之间的权衡。斑点噪声与组织的精细纹理在频域中部分重叠,单纯的噪声抑制策略必然会造成一定程度的纹理信息损失。当噪声去除模型过于激进时,微小靶区内的微细结构可能在去噪过程中被误判为噪声成分而被平滑掉,反而降低了增强后图像的诊断价值。相反地,消保守的去噪策略又无法有效消除背景中的斑点干扰。如何在去噪的强度与细节的完整保留之间找到最优平衡点,目前仍然是一个开放的技术问题。

另一个约束来自模型的泛化能力。基于深度学习的增强模型在训练数据上通常表现出优异的性能,但当迁移来自不同设备、不同扫查参数甚至不同体位的超声图像上时,其增强效果可能出现明显衰减。超声图像的成像差异具有多重来源,包括换能器的频率特性、波束形成算法的实现差异、以及人体组织的个体差异等。这一多样性的存在意味着,单纯依赖训练数据扩充来解决泛化问题具有内在的局限性,因为新的成像变化可能是不可预见的。对于微小靶区识别这一高度依赖图像细节敏感性的任务而言,模型迁移过程中的性能下降可能导致增强后图像中人造伪影的出现,从而误导医师的判断。

实时性要求构成了第三个约束条件。超声检查需要在扫查过程中实时反馈图像,医师根据图像质量的即时判断来调整探头位置和扫查参数。如果图像增强算法的计算延迟超过了可接受的实时处理窗口,其临床应用价值将大打折扣。许多先进的深度学习模型结构较为复杂,参数规模庞大,难以在不牺牲增强效果的前提下实现毫秒级的推理速度。模型压缩、知识蒸馏等轻量化技术虽然提供了一定的优化空间,但如何在计算资源受限的平台上同时满足实时性与增强精度的双重需求,仍然是该技术从实验室走向床边超声设备所必

须跨越的障碍。

4. 前瞻路径与技术演变趋势

未来,人工智能辅助超声图像增强在微小靶区识别中的应用将沿以下方向演进:方法论层面,无监督与自监督学习框架日益重要。传统监督学习依赖大量标注数据,而超声图像增强的理想目标图像在真实条件下难以获取。基于物理模型引导的无监督方法,将超声成像的前向物理模型与深度神经网络逆向求解相结合,在不依赖参考标准的情况下实现可解释的图像增强,同时降低对标注数据的依赖,提升模型跨设备、跨协议的迁移能力。增强策略层面,从通用图像质量改善向靶区自适应增强转变。通用增强虽能提升宏观质量,但未必服务于微小靶区识别。未来模型将引入任务引导的训练机制,优先保护与靶区检测相关的特征通道,在噪声抑制与细节保留的权衡中偏向最具诊断价值的信号成分,避免将模型容量分配到对临床决策无实质贡献的区域。信号处理链条前移,将深度学习从图像后处理阶段前移至波束形成与信号重建阶段。传统增强是在超声系统输出亮度模式图像后进行的,此时原始射频域的高动态范围信息已大量压缩。若在更早环节引入深度学习,在射频域直接实现噪声抑制与分辨率增强,其上限优于图像域后处理。基于深度学习的自适应波束形成已在实验室层面展现出超越传统延时叠加方法的潜力。多模态融合增强是另一前沿方向。将超声图像与CT或MRI进行空间配准与特征融合,为微小靶区识别提供互补解剖信息。该融合可在特征层级实现,使网络同时利用超声的实时优势与其他模态的高空间分辨率信息,特别适用于单一超声模式下难以清晰显示的微小靶区,为介入引导和深部病灶精准定位提供新可能。

可以预见,人工智能辅助超声图像增强将从辅助性后处理工具演进为超声成像系统的核心功能模块,从根本上改变微小靶区识别的技术范式。

参考文献:

- [1]孙晓宁,王宪,田翔宇,等.超声联合MRI及AI评估卵巢肿瘤的研究进展[J].中国医刊,2026,61(4):436-440.
- [2]张红莉.超声技术在妇科体检中的应用现状与未来发展趋势[J].影像研究与医学应用,2025,9(14):11-13.
- [3]兰永昊,孙泽宇,殷维钧,等.基于虚拟组织学-血管内超声的人工智能辅助冠状动脉CT血管成像斑块定量分析系统开发与验证[J].中国介入心脏病学杂志,2026,34(1):12-19.
- [4]柳燕,杜宇,刁雪红,等.常规超声联合剪切波弹性成像对比人工智能鉴别乳腺结节良恶性的应用价值[J].海军军医大学学报,2026,47(1):61-66.

吉林市科技创新发展计划项目【超声引导下同轴活检针穿刺联合半自动活检针在周围型肺癌病理活检的研究】编号:20230406110。