

超声技术在脊柱外科中的应用进展与展望

诸昌杰¹, 叶勇军²

¹赣南医科大学第一临床医学院, 江西 赣州

²赣南医科大学第一附属医院骨科, 江西 赣州

收稿日期: 2025年12月5日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月6日

摘要

超声技术作为一种无辐射、实时且经济的成像工具, 在脊柱外科领域的应用日益广泛, 其在软组织分辨方面的显著优势使其在脊柱疾病的诊断、介入治疗和手术导航中扮演着重要角色。在诊断方面, 超声可用于脊柱骨折的初步筛查、责任椎体定位及软组织损伤评估。在疼痛介入治疗中, 超声引导下的神经根阻滞、小关节注射以及各类神经阻滞技术, 实现了精准给药并有效避免了医患的辐射暴露。在手术导航领域, 超声导航系统为椎弓根螺钉置入等复杂操作提供了实时三维引导, 提升了手术的精确性与安全性。尽管该技术存在深部成像受限及操作者依赖性强等挑战, 但未来通过与人工智能、增强现实等前沿技术的融合, 超声技术在脊柱外科的应用潜力与价值将得到进一步拓展。

关键词

超声, 脊柱手术, 超声导航, 脊柱源性疼痛

Ultrasound Technology in Spinal Surgery: A Review of Advances and Prospects

Changjie Zhu¹, Yongjun Ye²

¹The First Clinical Medical College of Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

²Department of Orthopedics, The First Affiliated Hospital of Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

Received: December 5, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 6, 2026

Abstract

As a non-radiative, real-time, and cost-effective imaging modality, ultrasound technology is being increasingly utilized in the field of spinal surgery. Its remarkable advantage in soft tissue resolution enables it to play a vital role in the diagnosis, interventional treatment, and surgical navigation of spinal disorders. In diagnostics, ultrasound can be employed for the initial screening of spinal

fractures, localization of responsible vertebrae, and assessment of soft tissue injuries. For interventional pain management, techniques such as ultrasound-guided selective nerve root blocks, facet joint injections, and various nerve blocks facilitate precise drug delivery while effectively avoiding radiation exposure for both patients and medical staff. In the realm of surgical navigation, ultrasound navigation systems provide real-time 3D guidance for complex procedures like pedicle screw placement, enhancing surgical accuracy and safety. Although the technology faces challenges such as limited deep tissue imaging and strong operator dependence, its potential and value in spinal surgery are expected to be further expanded through future integration with advanced technologies like artificial intelligence and augmented reality.

Keywords

Ultrasound, Spinal Surgery, Ultrasound Navigation, Spinal Pain

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超声技术属于一种非侵入式, 无辐射且能即时成像的判断及引导工具, 在医学领域有着渐次宽阔的应用前景, 特别是在脊柱外科当中, 同传统的 X 线, CT 等成像手段相比, 超声在表现软组织时有着明显的优势。它能够清楚地显现脊柱周边的肌肉, 韧带, 神经以及血管等构造[1], 这对考量脊柱软组织损伤, 神经受压以及血管变异等状况十分有益, 比如, 超声可清楚显示颈椎的神经血管构造, 进而给颈椎穿刺或者神经阻滞之类的操作赋予精确的指引[2], 这便是对 X 线, CT 等重点在于显示骨骼构造的医学成像手段的一种重要充实。在慢性疼痛守护方面, 超声引导下的神经阻滞技术由于超声具备较好的软组织与神经识别能力而慢慢流行起来[3], 针对胸椎区疼痛的情况, 经由超声引导做关节注射和神经阻滞时, 也是依靠超声清晰显示软组织[4], 凭借这些特性, 超声在脊柱疾病判断, 手术导向以及介入性治疗当中发挥着越发关键的作用。

在脊柱疼痛的经营上, 超声引导下的介入治疗成了重要手段, 超声引导技术可清楚显示神经, 血管以及肌肉等软组织结构, 以此做到对脊柱相关结构的精准定位与治疗, 在颈椎疼痛治疗时, 经超声引导实施的小关节注射, 内侧支阻滞以及选择性神经根阻滞等, 已被证明是安全有效的[2]。

胸椎所引发的疼痛, 其应对方法包含超声引导下的脊柱旁肌平面阻滞, 胸椎小关节注射, 胸椎内侧支阻滞, 肋横突关节注射以及肋椎关节注射等, 这些技术渐渐成熟起来, 特别是在胸椎疼痛的介入性诊疗当中, 超声可以即时显现肌肉层, 胸膜, 神经和血管等软组织构造, 并做到对穿刺针的即时追踪, 同传统荧光透视引导比起来, 既缩减了患者又缩减了医生的辐射接触量[4]。

超声引导下颈椎小关节注射用于治疗颈椎小关节综合征时, 疗效良好, 该方法准确率较高, 可以有效地减轻疼痛, 缩减手术历时, 减小穿刺次数[5]。

2. 超声在脊柱骨折诊断与治疗中的应用

脊柱骨折属于脊柱外科较为常见的一种病症, 其诊断及治疗方案对于患者预后的意义不言而喻, 超声技术具备即时性与无创性的特征, 这使得它在脊柱骨折的初步判断, 责任椎体的确定, 微创治疗过程中的指引等方面有着潜在的应用价值, 特别是在减轻辐射接触量以及床边快速评价方面有着独有的长处。

2.1. 超声在骨质疏松性椎体压缩性骨折中的应用

骨质疏松性椎体压缩性骨折(osteoporotic vertebral compression fractures, OVCFs)属于骨质疏松症最常见并发症之列[6][7], 往往没有得到精准的判断与诊治。

2.1.1. 超声在 OVCFs 诊断中的应用

X 线是诊断 OVCFs 的标准影像学检查方法[7][8], 不过它也存在辐射风险, 超声属于无辐射, 经济又便捷的检查手段, 在 OVCFs 的诊断中有潜在的应用价值。超声可用来考量椎体高度, 椎体后缘连续性以及椎旁软组织等状况, 帮助判断是否发生椎体骨折, 特别是那些不能做 X 线检查的特殊人群(像孕妇)或者急需床旁快速筛查的患者, 超声也许会是一种有用的补充手段。

2.1.2. 超声在 OVCFs 治疗中的应用

椎体成形术包含椎体成形术(polyvinylpyrrolidone, PVP)和球囊扩张椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP), 它们都是用来医治 OVCFs 的常见微创手术手段[8]-[11]。在超声引导之下找到责任椎体, 可以凭借识别椎体表面的解剖标志, 再加上术前的影像学资料, 做到对目标椎体精准定位, 削减辐射剂量, 也许还能提升手术效率, 超声引导下的椎体成形术重点在于及时观察穿刺针的位置, 以此来改善手术的准确性和安全性, 减小骨水泥渗漏之类的并发症发生的可能性。

2.2. 超声在病理性脊柱骨折中的应用

病理性脊柱骨折指的是没有明显的外伤或者仅有轻微外伤的情况下, 因为潜在的骨骼病变(比如肿瘤转移, 骨髓瘤, 代谢性疾病等等)而引发的椎体骨折[12], X 线, CT 和 MRI 是病理性骨折判断的标准医学成像手段, 不过超声属于无辐射, 成本低而且可以床旁操作的医学成像技术, 在病理性脊柱骨折的初步检查以及介入治疗指引上也许存在应用意义。

2.2.1. 初步筛查与鉴别诊断

超声用于病理性脊柱骨折的初步筛查时, 重点在于考量椎体是否完整, 皮质是否连续, 还要看有无软组织肿块, 虽然超声对骨骼结构的穿透力小, 但是对颈部和腰部这些表层的椎体而言, 可以大致判定是否有骨质破坏或者变形, 而且, 超声能够检测到椎体周边的软组织, 了解是否存在肿瘤侵袭或者发炎情况。

2.2.2. 超声引导下的介入治疗

椎体成形术(PVP)以及球囊扩张椎体后凸成形术(PKP), 均为治疗病理性脊柱骨折的常见介入手段, 它们能够提升椎体的稳定性, 并减轻患者的疼痛感, 超声引导能优化穿刺的精确度, 缩减对周边神经与血管的伤害, 而且在超声引导之下, 可以随时监测穿刺针所处的方位, 从而保证它准确地到达椎体内部。

超声存在本身具有的局限, 所以它的判断能力会受这些局限制约, 并不能单独当作病理骨折的判断依照[13], 日后超声技术持续发展, 高频超声, 造影超声等等出现之后, 大概能够提升超声在判断病理脊柱骨折时的准确性及其应用范畴。

2.3. 超声在其他类型脊柱骨折中的应用潜力

虽然已有研究涉及超声在骨质疏松性椎体压缩性骨折以及病理性脊柱骨折中的应用情况, 但对于其他种类的脊柱骨折(比如外伤性脊柱骨折, 疲劳性骨折等)来说, 超声的应用潜力仍需进一步探究。

2.3.1. 外伤性脊柱骨折

外伤性脊柱骨折属于较为常见的脊柱损伤情况, 其成因可能是高能量损伤(比如交通事故或者从高处

摔下),也可能是低能量损伤[14],对于此类骨折的判断往往要依靠X线,CT这样的医学成像技术,不过超声也许能在如下方面给予额外的信息支持。

快速定位与初步评估:在急诊环境当中,超声可以立即找到可能出现骨折的地方,并给后续的影像学检查给予指引,超声能很快评判椎体棘突,椎板这些骨骼结构是否连贯,从而大致判定有没有骨折[15]。

软组织损伤评估:软组织损伤评定当中,超声能够考量椎旁肌肉,韧带等软组织的损伤状况,有益于掌握损伤的程度与范围,超声可检测棘间韧带的损伤[15],这对评定脊柱的稳定性颇具价值。

床旁动态评估:床旁动态评定:针对那些病势沉重又无法移动的患者,超声可在其床边执行多次检测,以此来动态考量骨折移位状况以及软组织损害的改变情形。

虽然超声在治疗外伤性脊柱骨折方面颇具潜力,但也存在一些局限之处,超声对骨骼的穿透力比较弱,很难清楚地显现深层结构,而且很容易被气体和骨骼产生的伪影所影响,所以,超声一般只能作为辅助性的判断工具,并不能取代X线,CT这些传统的医学成像方法。

2.3.2. 疲劳性骨折

疲劳性骨折又称为应力性骨折,其成因在于骨骼长时间承受重复性应力,引发骨骼微结构逐步受损,进而引发骨折现象[16],超声在疲劳性骨折的判断过程中也许会起到如下几方面的作用。

早期筛查:对于存在疲劳性骨折高危因素的人群而言,超声适合作为一种初步筛查工具,它能够监测骨骼表面的细微改变,比如骨膜增厚,骨皮质不连续等情况,这些可能属于疲劳性骨折的早期症状。

疼痛定位:超声能够引导对疑似骨折处实施局部探查,从而确定疼痛源,经由超声引导下的局部麻醉,可以区分疼痛是源自骨骼还是其他部位。

疗效评估:在疲劳性骨折保守治疗期间,超声可用于监测骨折愈合状况,超声可观察骨痂生成过程,以此来评价骨折的稳定性。

2.3.3. 特殊部位脊柱骨折

脊柱骨折可发生在各个节段,各节段骨折各有特性,寰椎骨折常见于老年人,往往伴随其他部位损伤[17],不过,超声在这些特定部位骨折上的应用潜力仍需深入探究,就拿寰椎骨折来说,超声也许能用来考量寰枢关节的稳定性,帮助判断是否必要施行手术,至于胸腰椎骨折,超声能够评定肋椎关节的受损状况[18]。

3. 超声引导下脊柱疼痛介入治疗

脊柱疼痛属于临床上比较常见的症状,会给患者的生活质量带来很大影响,而超声引导下的介入治疗具有即时性,无需开刀,没有辐射等优点,所以渐渐被广泛用于脊柱疼痛的处理当中。

3.1. 超声引导下神经根阻滞

选择性神经根阻滞(selective nerve root block, SNRB)属于常见的疼痛介入治疗方法,目的在于改善因神经根受压或者发炎而产生的疼痛,以往的SNRB常常依靠X线透视来执行操作,不过超声引导技术具有无辐射,可以即时显现图像等优点,所以近年来在脊柱外科方面慢慢被人们所关注。

3.1.1. 超声引导下颈椎选择性神经根阻滞

颈椎疼痛属于临床上常见的症状,如果保守治疗没有效果,那么颈椎注射治疗便可以作为一种选择[2]。之前的研究所表明,超声引导下的选择性神经根阻滞(SNRB)可当作一种诊断工具,用来预测多节段颈椎病患者施行选择性前路颈椎间盘切除融合术后会取得怎样的临床效果,一项随机对照试验显示,那些接受了超声引导下SNRB的患者,他们术后疼痛视觉模拟量表(visual analogue scale, VAS)评分明显低

于对照组,而且疼痛减轻的程度以及颈椎功能障碍指数的改善情况也更为突出[19],这表明超声引导下的选择性神经根阻滞(SNRB)对于确定手术节段有着重要的意义。

对于常规超声引导颈神经根阻滞治疗无效应的颈神经根病患者而言,一种新型的侧方入路超声引导经椎间孔颈神经根阻滞表现出较好的临床效果,这项技术利用即时荧光透视来监测对比剂的扩散形式,并两次确认针尖的位置,从而提升治疗的精准度,一项回顾性病例系列研究显示,经侧方入路超声引导经椎间孔颈神经根阻滞可有效改善患者的疼痛状况,其症状改善率也比较高。

近期的研究进一步表明,超声引导下的选择性神经根阻滞(SNRB)对于慢性颈神经根病的治疗具有疗效,一项针对 720 名颈神经根病患者的回顾性分析显示,超声引导下的选择性神经根阻滞(SNRB)可有效改善症状,而且可能缩减手术需求,75%的患者在超声引导下的选择性神经根阻滞(SNRB)之后症状明显好转[20],这表明选择性神经根阻滞(SNRB)是一种颇具潜力的保守治疗方法。

3.1.2. 超声引导下腰椎选择性神经根阻滞

腰椎 SNRB 也是治疗因腰椎间盘突出,腰椎管狭窄等病症引发神经根性疼痛的一种常见手段,它不像依靠 X 线透视引导那样会让人接受辐射,而且还能随时看到软组织的情况。有一项回顾性研究把超声引导下的腰椎 SNRB 和 X 线透视引导下的腰椎 SNRB 在准确性和有效性上做了对比,结果表明,这两种方法在减轻疼痛的效果差不多,但是采用超声引导时,手术历时更短,穿刺角度要调整的次数也远比 X 线透视引导来得少[21],这就显示出超声引导下的腰椎 SNRB 在操作效率和安全水平上有一定优势。两者之间的对比差异可见表 1。

Table 1. Comparison of ultrasound-guided SNRB and X-ray fluoroscopy-guided SNRB
表 1. 超声引导 SNRB 与 X 线透视引导 SNRB 的对比

项目	超声引导 SNRB	X 线透视引导 SNRB
优势	无辐射、实时可视化软组织结构、操作时间短	对骨性结构显像清晰
劣势	对骨性结构显像不如 X 线清晰、需要较高操作技巧	有辐射暴露
准确性	与 X 线透视引导相似	与超声引导相似
有效性	与 X 线透视引导相似	与超声引导相似
适应症	软组织病变引起的神经根性疼痛	骨性结构异常引起的神经根性疼痛或需要精确定位

3.1.3. 超声引导 SNRB 在脊柱疼痛治疗中的其他应用

超声引导下出现了一些新的脊柱疼痛介入治疗手段,并非只是传统的 SNRB,其中就包含超声引导下注射针刀松解术,此法属于微创介入疗法,在颈椎病性神经根病的诊治中有一定潜力[22],一项随机对照试验显示,超声引导下注射针刀松解术短期内效果和超声引导 SNRB 差别不大,但长期来看其效果更好[22]。

超声引导技术有着独特的优势,已成为脊柱外科疼痛管理中一种重要的辅助手段,伴随技术持续发展以及临床经验逐步增多,超声引导 SNRB 及其相关技术将会在脊柱疼痛的诊断与治疗方面起到更大的作用。

3.2. 超声引导下小关节注射

小关节是脊柱后方非常关键的结构,这种结构发生病变时,常常会引发颈部,胸部,腰部以及背部的疼痛,经由超声引导实施小关节注射,包含内侧支阻滞(Medial Branch Block, MBB)以及关节腔内注射,

这已然成为一种比较重要的非手术治疗方法。

3.2.1. 颈椎小关节注射

颈椎小关节疼痛属于颈痛常见病因, 若保守治疗未见效, 则颈椎小关节注射可作为替代方案, 超声引导较之 X 线透视引导存在诸多优势, 譬如无辐射, 可即时可视化显示软组织及血管等, 经由超声, 能够清楚显现颈椎小关节解剖结构, 进而达成精确注射的目的, 当下, 超声引导下颈椎小关节注射主要包含内侧支阻滞和关节腔内注射这两种形式[2]。

超声引导下颈椎内侧支阻滞(MBB): 颈椎内侧支阻滞目的在于阻断控制小关节的神经分支, 以此来达成减轻疼痛的效果, 依靠超声引导, 医生能够清楚看到颈椎内侧支神经的走向, 进而精准地把药物注入到神经附近。

超声引导下颈椎小关节腔内注射: 超声引导下颈椎小关节腔内注射这种方法, 会把药物直接注入小关节腔, 以此来改善关节炎症及疼痛状况, 超声引导能够提升注射的精准度, 减小对周边组织的损害。一项系统评价显示, 超声引导下颈椎小关节注射的准确率处于较高水平(92%~98%采用侧位入路), 而且与 X 线引导对比, 超声引导不但能缩减操作时间, 削减穿刺次数, 还能免除辐射暴露, 但是这项研究也着重指出, 超声引导下注射的疗效非常依赖于操作者的经验与技术。

3.2.2. 胸椎小关节注射

胸椎区域的解剖结构很复杂, 所以, 经超声引导做胸椎小关节注射存在一些难点。不过, 超声不像 X 线透视那样, 要依靠射线才能成像, 它可随时显现肌肉层, 胸膜, 神经以及血管等软组织结构, 这便提升了注射的安全性, 采用超声引导做胸椎小关节注射包含两种方法, 即内侧支阻滞法和关节腔内注射法[4]。

超声引导下胸椎内侧支阻滞: 在超声引导之下, 医生能够看到肋横突关节, 这个部位可当作定位内侧支神经的参照, 进而精准地把药物注入到指定区域。

超声引导下胸椎小关节腔内注射: 超声引导下胸椎小关节腔内注射, 经由超声引导把药物精准注入胸椎小关节腔, 从而缓解炎症与疼痛。

超声用于胸椎的文献较少, 不过它在可视化软组织上存在优势, 所以其在胸椎小关节注射中有一定的应用前景。

3.2.3. 腰椎小关节注射

腰椎小关节往往是腰背痛的源头之一, 超声能够准确显示腰椎小关节间隙, 经由超声引导实施腰椎小关节注射, 涵盖内侧支阻滞及关节腔内注射, 这已在临床上全面开展[23] [24]。

超声引导下腰椎内侧支阻滞: 超声引导下实施腰椎内侧支阻滞时, 医生能够看到横突, 将其当作定位腰椎内侧支神经的标志, 要知道, 超声引导下执行腰椎内侧支阻滞存在一定技术难点, 一项系统评价和荟萃分析表明, 相比于 X 线透视或者 CT 确认, 超声引导下腰椎内侧支阻滞出现误穿的风险更大, 这项研究觉得, 超声技术自身存在的局限以及患者个体之间的差异大概就是造成误穿现象的原因所在[23]。

超声引导下腰椎小关节腔内注射: 超声引导下腰椎小关节腔内注射类似于内侧支阻滞, 同样存在一定误穿风险, 一项荟萃分析表明, 该方法的误穿风险为 13% [23], 即便如此, 一项回顾性研究显示, 此方法可用于缓解腰椎术后疼痛综合征患者的疼痛状况并改善其活动范围[25]。

超声引导下小关节注射在脊柱疼痛治疗中有一定的应用价值, 但超声技术存在局限性, 而且患者个体有差异, 所以操作者需精通超声技能并了解解剖知识, 这样才能提升注射的准确性和安全性, 还要做进一步研究, 去评价超声引导下小关节注射的长期疗效及其可能出现的并发症。

3.3. 超声引导下其他疼痛介入治疗

除了神经根阻滞和小关节注射, 超声引导技术在脊柱疼痛管理中还存在其他潜在的应用。

颈丛神经阻滞常被用来诊治颈源性头痛, 颈部肌肉痉挛之类的病症, 借助超声引导做颈丛神经阻滞的时候, 可以清楚看到颈丛神经的解剖情况, 还能随时引导穿刺针朝着目标方向去, 这样就提升了操作的精准度和安全系数[3]。而治疗枕神经痛常常会用到枕大神经阻滞这个办法, 枕大神经就在枕部皮肤下面, 走起来比较靠近表面, 所以超声能清楚显示它还有旁边那些血管的构造, 从而帮助穿刺针准确抵达神经附近, 减小伤害血管的可能性并改善阻滞的效果[3]。脊柱周围的软组织和肌肉常常会发生疼痛, 斜方肌, 菱形肌等部位的疼痛就属于这种情况, 它们也是慢性疼痛的一些常见诱因。在超声引导之下, 可以针对这些软组织和肌肉实施精确注射, 把药物直接送进病变区域, 从而加强治疗效果, 针对胸椎区域的慢性疼痛来说, 采用超声引导下的介入手段也表现出独有的优势, 比如经由超声引导能够向胸椎小关节内部注射药液, 执行胸椎内侧支阻断术, 做肋横突关节注射以及肋椎关节注射等等[4]。超声清晰显现肌肉层, 胸膜, 神经, 血管等软组织, 并做到针头即时追踪, 相比于传统荧光透视引导而言, 其削减了患者及医生的辐射暴露量, 而且, 竖脊肌平面阻滞在超声引导下越发常见, 该方法多用于胸椎术后疼痛, 肋骨骨折疼痛的诊治[4]。

4. 超声在脊柱外科手术导航中的应用

脊柱外科手术变得越发复杂, 在此情形下, 手术导航技术成了优化手术精度与安全性的的重要因素, 超声导航技术具有无辐射, 可随时成像这些特性, 正在脊柱外科慢慢表现出独有的价值。有学者[26]已经将超声应用于脊柱椎弓根钉置入术中, 可以检测钉道的完整性。

4.1. 超声导航系统原理与优势

超声导航系统属于新兴的脊柱外科导航技术, 它的工作原理靠超声波的即时成像功能, 这样就能给外科医生在术中给予准确的解剖结构信息, 做到对手术计划及操作的精确指引, 相比于传统导航系统, 比如依靠 X 线透视或者 CT 的导航系统, 超声导航系统在脊柱外科有着很大的优势, 这些优势主要集中于如下几处:

无辐射: 传统导航系统依靠 X 线或者 CT 成像, 术中需多次扫描, 患者及医护人员会受到电离辐射, 超声导航系统以超声波成像为基础, 不存在电离辐射, 可大幅缩减辐射风险, 特别适合儿童和孕妇等特殊群体。

实时更新: 超声导航系统会随时获取并更新图像信息, 给外科医生给予动态的手术视野[27], 这表明能够立即观测手术过程中的变化, 组织移位, 出血等情况, 进而及时调整手术方案, 以提升手术的精准性和安全性。

软组织可视化: 超声波对于软组织具备不错的分辨能力, 能够清楚显现肌肉, 韧带, 神经等软组织结构, 于是, 超声导航系统既能指引骨性结构的定位与操作, 又可助力外科医生规避关键的软组织结构, 缩减术中受损的可能性, 以往的 X 线或者 CT 导航系统在软组织可视化上存在局限之处, 很难给予充足的信息。

4.2. 超声引导下椎弓根螺钉置入

椎弓根螺钉置入属于脊柱外科手术中的常见内固定技术, 其准确与否会直接左右手术效果以及患者的预后情况, 传统的椎弓根螺钉置入大多依靠术中的 X 线透视来完成, 不过这种方法存在辐射暴露以及二维图像缺乏空间信息等弊端, 而超声引导导航技术则给椎弓根螺钉置入带来了新的解决途径, 该技术

可帮助术者在手术过程中随时执行定位, 规划路径并核实位置, 以此提升置钉的精准程度, 减小对血管神经造成损害的风险。

超声引导下椎弓根螺钉置入重点在于凭借超声图像创建脊柱的三维结构, 进而以此作为基础实施术中导航, 超声导航系统一般包含超声探头, 图像处理单元以及导航软件, 手术期间, 经由超声探头对脊柱执行扫描, 得到一系列超声图像, 这些图像在经过处理之后能够形成椎体的三维模型, 从而显示出椎弓根所处的位置, 朝向与形状。

4.3. 超声导航在脊柱骨折复位与固定中的应用

超声导航技术在脊柱骨折复位与固定手术中有独特优势, 特别在评定骨折断端对位状况, 改良内固定方案, 随时监测复位效果等方面。当前文献中关于超声导航在脊柱骨折复位固定应用的报道不多, 但它所具有的潜在价值和应用前景不可忽略。

骨折断端对位评估: 骨折断端对位的传统评定依靠术中的 X 线透视或者 CT 扫描, 而超声导航能给予即时的多平面图像信息, 这有益于外科医生更为精准地评判骨折断端的复位状况。超声可清楚显现骨皮质的连贯性, 进而利于判断骨折是否做到了解剖复位, 纵使当下尚无直接证据表明超声导航在这方面比传统方法更准确, 但是超声具备即时性和无辐射的特点, 所以它是一种颇具吸引力的替代选择。

内固定方案优化: 内固定方案若要改良, 则需考量骨折种类, 位置以及患者骨质状况等因素, 以往做法大多依靠术前影像学检查并结合术中透视, 而超声导航可于术中创建立体模型, 进而更为精准地度量椎弓根的长度与直径, 以此选定恰当的螺钉尺寸, 保障内固定既稳固又安全, 而且, 超声导航还可帮助判定椎弓根螺钉的植入角度[27], 减小螺钉周围发生骨折或者偏移的可能性。

骨折复位效果的实时监测: 超声导航能够随时监测骨折复位过程中的变化状况, 外科医生可凭借超声图像来观察骨折断端逐步对位的情形, 按照实际情形调整复位方案, 以使复位效果达到理想水平, 而且, 超声可用于评定复位之后内固定结构是否稳定, 经由超声振动分析, 可以判断内固定螺钉是否有松动或者偏移现象, 从而及早察觉潜在风险。

5. 未来展望与挑战

超声技术在脊柱外科领域有着很大的应用潜力, 不过, 要广泛地应用它还是碰上不少难题, 重点在于深部结构成像存在局限, 有骨骼遮挡现象, 而且跟操作者有关联这些方面, 对于这些难点, 得要持续考察新的解决办法。

科技飞速发展之际, 人工智能[28]在医学影响领域得以全面应用, 日后, 着重探究超声技术同人工智能(artificial intelligence, AI), 加强现实(augmented reality, AR)等先进技术相融合的情况, 还有高分辨率超声, 三维超声这些新超声技术的发展动态, 从而改善成像质量并加强手术导航的精准度。

参考文献

- [1] Patel, M.R., Jacob, K.C., Parsons, A.W., Chavez, F.A., Ribot, M.A., Munim, M.A., *et al.* (2022) Systematic Review: Applications of Intraoperative Ultrasonography in Spinal Surgery. *World Neurosurgery*, **164**, e45-e58. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.02.130>
- [2] Moreno, B. and Barbosa, J. (2021) Ultrasound-Guided Procedures in the Cervical Spine. *Cureus*, **13**, e20361. <https://doi.org/10.7759/cureus.20361>
- [3] Li, J. and Szabova, A. (2021) Ultrasound-Guided Nerve Blocks in the Head and Neck for Chronic Pain Management: The Anatomy, Sonoanatomy, and Procedure. *Pain Physician*, **24**, 533-548.
- [4] Ferreira-Silva, N., Ribas, R., Hurdle, M.F.B., Gupta, S., Clendenen, S.R. and Ferreira-Dos-Santos, G. (2024) Ultrasound-Guided Procedures for the Management of Chronic Thoracic Back Pain: A Technical Review. *Journal of Ultrasound*, **27**, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40477-023-00825-0>

- [5] Viva, M.G., Sveva, V., Ruggiero, M., Fai, A., Savina, A., Perrone, R., *et al.* (2024) Efficacy and Accuracy of Ultrasound Guided Injections in the Treatment of Cervical Facet Joint Syndrome: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, **13**, Article 5290. <https://doi.org/10.3390/jcm13175290>
- [6] Kutsal, F.Y. and Ergin Ergani, G.O. (2021) Vertebral Compression Fractures: Still an Unpredictable Aspect of Osteoporosis. *Turkish Journal of Medical Sciences*, **51**, 393-399. <https://doi.org/10.3906/sag-2005-315>
- [7] McDonald, C.L., Alsoof, D. and Daniels, A.H. (2022) Vertebral Compression Fractures. *Rhode Island Medical Journal*, **105**, 40-45.
- [8] Alsoof, D., Anderson, G., McDonald, C.L., Basques, B., Kuris, E. and Daniels, A.H. (2022) Diagnosis and Management of Vertebral Compression Fracture. *The American Journal of Medicine*, **135**, 815-821. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2022.02.035>
- [9] Raja, J., DiFatta, J., Huang, J. and Dunleavy, D. (2024) Vertebral Augmentation: How We Do It. *Techniques in Vascular and Interventional Radiology*, **27**, Article 100979. <https://doi.org/10.1016/j.tvir.2024.100979>
- [10] Beall, D.P. and Phillips, T.R. (2023) Vertebral Augmentation: An Overview. *Skeletal Radiology*, **52**, 1911-1920. <https://doi.org/10.1007/s00256-022-04092-8>
- [11] Akbaş, M., Salem, H.H., Dinç, B., *et al.* (2020) Kyphoplasty Experience in an Elderly. *Agriculture*, **32**, 238-239.
- [12] Mohamad, J. (2025) Pathological Spine Fractures. *Radiologie (Heidelb)*, **65**, 854-858.
- [13] Wuennemann, F., Kintzelé, L., Weber, M.A., *et al.* (2020) Radiologic Diagnosis of Pathologic Fractures. *Radiologe*, **60**, 498-505.
- [14] Olinger, C. and Bransford, R. (2021) Upper Cervical Trauma. *Orthopedic Clinics of North America*, **52**, 451-479. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2021.05.013>
- [15] Altunrende, M.E. and Ekin, E.E. (2025) Traumatic Isolated Spinous Process Fractures. *Ulusal Travma ve Acil Cerrahi Dergisi*, **31**, 394-398.
- [16] Tsatsaragkou, A., Vlasis, K., Raptis, K., *et al.* (2022) Fatigue Sacral Fractures: A Case Series and Literature Review. *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, **22**, 385-392.
- [17] Fiedler, N., Spiegl, U.J.A., Jarvers, J., Josten, C., Heyde, C.E. and Osterhoff, G. (2020) Epidemiology and Management of Atlas Fractures. *European Spine Journal*, **29**, 2477-2483. <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06317-7>
- [18] Mennen, A.H.M., de Ruiter, K.J. and van Embden, D. (2020) Traumatic Costovertebral Joint Dislocation. *BMJ Case Reports*, **13**, e234931. <https://doi.org/10.1136/bcr-2020-234931>
- [19] Abdelrady, M.M., Lam, K.H., Shabaan, N., Hassanien, M., Mokbel, E., Nada, D.W., *et al.* (2024) Selective Ultrasound-Guided Nerve Root Block Improves Outcomes for Discectomy in Patients with Cervical Disc Disease: A Randomized, Controlled, Single-Blinded Study. *Minerva Anestesiologica*, **90**, 748-758. <https://doi.org/10.23736/s0375-9393.24.17989-8>
- [20] Joo, H.J., Choi, S., Kim, B.H., Kim, M., Shim, G.Y., Chung, S.J., *et al.* (2024) Therapeutic Efficacy of Ultrasound-Guided Selective Nerve Block on Chronic Cervical Radiculopathy. *Medicina*, **60**, Article 1002. <https://doi.org/10.3390/medicina60061002>
- [21] Wang, B., Sun, Y., Zhang, J., Meng, H., Zhang, H. and Shan, L. (2024) Ultrasound-Guided versus Fluoroscopy-Guided Lumbar Selective Nerve Root Block: A Retrospective Comparative Study. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 3235. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53809-3>
- [22] Pu, J., Cao, W., Chen, Y., Fan, Y. and Cao, Y. (2023) Ultrasound-Guided Injection Acupotomy as a Minimally Invasive Intervention Therapy for Cervical Spondylotic Radiculopathy: A Randomized Control Trial. *Annals of Medicine*, **55**, Article 2233556. <https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2233556>
- [23] Ashmore, Z.M., Bies, M.M., Meiling, J.B., Moman, R.N., Hassett, L.C., Hunt, C.L., *et al.* (2022) Ultrasound-Guided Lumbar Medial Branch Blocks and Intra-Articular Facet Joint Injections: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PAIN Reports*, **7**, e1008. <https://doi.org/10.1097/pr9.0000000000001008>
- [24] Ye, L., Wen, C. and Liu, H. (2018) Ultrasound-Guided versus Low Dose Computed Tomography Scanning Guidance for Lumbar Facet Joint Injections: Same Accuracy and Efficiency. *BMC Anesthesiology*, **18**, Article No. 160. <https://doi.org/10.1186/s12871-018-0620-7>
- [25] Çırak, M. and Okur, S.Ç. (2020) Does Ultrasound-Guided Facet Joint Injection Reduce Pain and Improve Mobility in Patients with Failed Back Surgery Syndrome? *Joint Diseases and Related Surgery*, **31**, 564-570. <https://doi.org/10.5606/ehc.2020.75727>
- [26] Kantelhardt, S.R., Bock, C.H., Larsen, J., Bockermann, V., Schillinger, W., Rohde, V., *et al.* (2009) Intraosseous Ultrasound in the Placement of Pedicle Screws in the Lumbar Spine. *Spine*, **34**, 400-407. <https://doi.org/10.1097/brs.0b013e31819286ca>
- [27] Richter, P.H. and Gebhard, F. (2023) Application of Navigation in the Fractured Spine. *Operative Orthopädie und*

Traumatologie, **35**, 29-36.

- [28] Schileo, E. and Taddei, F. (2021) Finite Element Assessment of Bone Fragility from Clinical Images. *Current Osteoporosis Reports*, **19**, 688-698. <https://doi.org/10.1007/s11914-021-00714-7>