

机器人导航辅助下UBE治疗腰椎滑脱合并椎管狭窄的效果分析

黎荣斌¹, 徐房添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: 2026年7月20日; 录用日期: 2026年8月13日; 发布日期: 2026年8月20日

摘 要

腰椎滑脱合并椎管狭窄是中老年人群中高发的脊柱退行性病变, 常规开放术式虽应用广泛, 但组织损伤明显, 恢复周期较长。在处理复杂滑脱病例时, 传统单侧双通道内镜(Unilateral Biportal Endoscopy, UBE)技术常受限于螺钉植入准确性不足与复位过程控制能力较弱等问题。近年来, 随着骨科手术机器人导航系统的引入并与UBE技术结合, 显著提升了脊柱微创治疗的精准度, 推动了该类疾病干预策略的技术革新。本文基于近年国内外前沿临床研究资料, 系统梳理机器人导航辅助UBE的技术基础、病理机制、操作规范、实际疗效、当前局限及未来发展趋势, 重点整合国际领先研究中的关键数据, 阐明其在实现精确置钉、微创减压以及脊柱稳定性重建方面的核心价值, 旨在为临床实践和技术推广提供可靠依据。

关键词

机器人导航, 单侧双通道内镜, 腰椎滑脱, 腰椎管狭窄, 脊柱微创, 临床疗效

Effect Analysis of Robot Navigation-Assisted UBE in the Treatment of Lumbar Spondylolisthesis Combined with Spinal Stenosis

Rongbin Li¹, Fangtian Xu²

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: July 20, 2026; accepted: August 13, 2026; published: August 20, 2026

文章引用: 黎荣斌, 徐房添. 机器人导航辅助下 UBE 治疗腰椎滑脱合并椎管狭窄的效果分析[J]. 临床医学进展, 2026, 16(8): 1857-1868. DOI: 10.12677/acm.2026.1682971

Abstract

Lumbar spondylolisthesis combined with spinal stenosis is a highly prevalent degenerative spinal disease among middle-aged and elderly populations. Conventional open surgery is accompanied by severe tissue damage and long recovery periods. When managing complex spondylolisthesis, traditional Unilateral Biportal Endoscopy (UBE) is limited by insufficient screw placement accuracy, poor controllability of reduction, and excessive radiation exposure for both surgeons and patients. The integration of orthopedic surgical robot navigation systems and UBE technology has greatly improved the precision of minimally invasive spinal surgery and promoted technological innovation for minimally invasive treatment of this disease. Based on recent domestic and international clinical studies, this paper systematically elaborates the technical principles, pathological adaptation basis, standardized surgical procedures, clinical efficacy, existing limitations and development prospects of robot navigation-assisted UBE. Core data from multi-center controlled clinical trials are summarized to clarify its clinical advantages including submillimeter accurate screw implantation, sufficient minimally invasive decompression, controllable spinal reduction and stability reconstruction, providing evidence-based references for standardized clinical application and technical popularization at primary medical institutions.

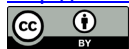
Keywords

Robot Navigation, Unilateral Biportal Endoscopy, Lumbar Spondylolisthesis, Lumbar Spinal Stenosis, Minimally Invasive Spine Surgery, Clinical Efficacy

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

腰椎滑脱伴随椎管狭窄是脊柱外科领域高发的复合型退行性疾患, L4-L5 与 L5-S1 节段为最常受累区域[1]。随着全球人口老龄化趋势持续加剧, 该疾病的检出率呈现逐年上升态势。其病理过程涉及多种结构改变: 椎间盘退化引发椎体失稳, 关节突增生并向内聚集, 黄韧带增厚且失去弹性, 加之腰骶部力学环境紊乱, 最终导致椎体发生移位。上述变化使得椎管、侧隐窝及神经根管的空间被压缩, 造成神经根或马尾神经长期受压。临床症状以顽固性腰背痛为主, 伴有下肢感觉减退、肌力下降、间歇性跛行以及排便排尿功能障碍, 显著削弱患者的步行能力与日常生活质量[2]。当患者接受保守治疗超过三个月仍未见改善, 且神经压迫表现进行性加重时, 手术干预成为首选策略。手术目标涵盖彻底完成椎管减压、实现滑脱节段的精确复位、完成椎间融合以恢复脊柱序列稳定, 同时力求最小化手术创伤并缩短术后恢复周期。传统后路开放减压联合内固定融合术作为经典方案, 虽可有效缓解神经压迫并重建脊柱稳定性, 但需实施长度达 10~15 厘米的后正中切口, 广泛剥离椎旁肌群, 并大范围切除椎板和关节突结构, 由此带来术中出血量增加、软组织损伤严重等问题。术后常出现腰部肌肉萎缩、慢性疼痛发生率升高以及住院时间延长等后果, 尤其对合并高血压、糖尿病等基础疾病的高龄个体而言, 围术期风险显著上升。

单侧双通道内镜(UBE)技术作为一种新兴的脊柱微创手段, 因其独立设置观察通道与操作通道, 具备视野清晰、操作灵活度高、组织破坏小等优势, 已逐步成为治疗腰椎退行性病变的重要选择[3]。然而, 在处理合并腰椎滑脱与椎管狭窄这类复杂病例时, 患者原有的解剖标志发生偏移, 椎弓根形态与走向异

常, 常规 UBE 下经皮置钉主要依赖术者经验配合 C 臂机术中透视引导, 易导致螺钉位置偏差、复位精度不足、神经血管结构损伤风险增高, 同时医患双方接受的放射暴露剂量较大, 限制了该技术在高难度病例中的推广使用[4]。

骨科手术机器人导航系统的问世及其持续迭代, 有效弥补了传统 UBE 技术在精准控制方面的缺陷。该系统通过术前影像数据构建三维解剖模型, 结合术中实时定位功能, 能够对椎弓根螺钉植入路径实现亚毫米级规划与动态引导。将机器人导航的高精度特性与 UBE 技术的微创优势相结合, 形成了机器人辅助下的 UBE 新型手术模式[5]。近年来, 这一融合技术在全球范围内逐步推广应用, 多项国际临床研究证实其在治疗腰椎滑脱合并椎管狭窄中体现出精准性高、创伤小、安全性好和效率突出的特点, 已成为脊柱微创外科领域的重点发展方向。本文基于当前国内外最新临床证据, 系统梳理该技术在实际应用中的进展与更新。

2. 腰椎滑脱合并椎管狭窄的病理生理与临床评估体系

(一) 核心病理生理特点

大部分的腰椎滑脱合并椎管狭窄病例源于退行性改变, 少数则由峡部裂引发, 其病理表现具有广泛性和高度复杂性。首先, 椎间盘退变常伴随水分流失与高度降低, 导致椎间隙缩窄, 进而破坏椎体前后的力学平衡, 诱发椎体前后方向的异常移位; 其次, 关节突关节增生、内聚并形成骨赘, 黄韧带增厚, 部分出现钙化及缩短, 上述结构性变化共同作用, 使中央椎管、侧隐窝和神经根通道在三维空间上受压, 形成多部位狭窄; 再者, 当滑脱椎体发生位移时, 神经根不仅受到牵拉与扭曲, 还因椎管容积减小而遭受压迫, 继发缺血、水肿及炎性反应, 最终引发多样化的神经功能障碍[6]。

该类疾病的病理进程呈渐进性发展: 早期阶段主要表现为轻度腰椎不稳定, 尚未出现明显神经压迫征象; 随着病情进展, 滑脱程度加重, 椎管狭窄愈发显著, 神经受压症状逐步显现并持续恶化, 在严重状态下可导致下肢肌力下降、肌肉萎缩, 甚至出现膀胱或直肠功能障碍。为避免神经组织发生不可逆损伤, 应及时采取手术干预。国际研究指出, 此类复合性病理状态要求手术同时实现减压、复位与固定, 仅行减压无法纠正滑脱所致的生物力学失稳, 这也构成了微创技术临床应用中的核心挑战[7]。

(二) 临床分型与病情评估标准

临床上评估腰椎滑脱合并椎管狭窄时, 需综合影像学表现与患者的临床症状及体征, 构建标准化的评估流程, 为制定手术策略提供依据。依据 Meyerding 分级系统, 腰椎滑脱分为四个等级: I 度指滑脱幅度不足 25%, II 度介于 25%至 50%之间, III 度为 50%到 75%范围内, 而 IV 度则超过 75%。目前, 机器人导航辅助下的单侧双通道内镜(UBE)技术主要适用于 I~II 度轻度滑脱患者; III 度滑脱被视为相对适应证; 至于 IV 度重度滑脱, 因脊柱解剖结构破坏严重, 通常不推荐采用此类微创术式。

根据 Porter 分型, 腰椎管狭窄可分为中央型、侧隐窝型、神经根管型以及混合型, 其中多数病例表现为混合型狭窄。因此, 在实施减压手术时, 必须全面考虑多区域神经组织受压情况并进行相应松解。术前应获取腰椎正位、侧位及过伸过屈位 X 线影像, 用于判断椎体稳定性与滑脱程度; 同时行腰椎薄层 CT 扫描, 以清晰显示椎弓根形态、直径、走行方向及骨性椎管狭窄的具体情况; 还需完成 3.0T MRI 检查, 明确椎间盘退变状态、黄韧带肥厚与否、神经受压部位以及是否存在脊髓水肿等信息, 并结合患者的骨质疏松状况和全身健康条件, 进一步排除手术禁忌[8]。

(三) 手术治疗核心原则

依据国际脊柱外科诊疗指南, 腰椎滑脱合并椎管狭窄的手术干预需遵循四项核心原则: 首先, 实现彻底减压, 即对椎管、侧隐窝及神经根管实施充分松解, 避免因压迫残留导致术后症状复发; 其次, 进行精准复位, 在纠正滑脱椎体位置的同时恢复脊柱正常生理曲度与椎管容积, 防止因过度矫正引发神经

牵拉损伤;再次,确保稳定融合,通过椎间植骨促成病变节段的长期固定,预防滑脱再发;最后,强调微创理念,尽可能减少对软组织和骨结构的破坏,降低手术相关并发症风险,并促进术后功能恢复[9]。机器人导航辅助下的 UBE 技术在实践中契合上述要求,实现了手术精确性与创伤控制的良好统一。

3. 机器人导航辅助 UBE 技术的核心原理与技术优势

(一) 技术核心原理

机器人导航辅助的 UBE 技术整合了骨科手术机器人的三维导航能力与单侧双通道内镜微创操作系统的功能,构建出涵盖“术前精准设计、术中实时引导、镜下精细干预”的完整手术路径。在手术准备阶段,将患者腰椎的薄层 CT 和 MRI 影像资料导入导航平台,系统借助人工智能算法重建出腰椎三维结构,对椎弓根、神经根、滑脱椎体及椎管狭窄区域等关键解剖标志进行精确识别,并自动生成椎弓根螺钉的进钉点、置入角度、深度与规格建议;同时,系统还会计算出 UBE 观察通道与操作通道对应的最优皮肤切口位置,避开主要血管与神经走行区,从而制定个体化的手术策略。

手术实施时,患者取俯卧位并保持腹部悬空,以减少椎管内静脉压力和出血风险。完成常规消毒铺巾后,进行机器人导航系统的注册与配准,利用机械臂提供持续的空间定位支持。在导航监控下经皮置入椎弓根导针,动态调整其空间位置,确认准确无误后植入螺钉,再通过连接棒实现滑脱椎体的精准复位,恢复椎体正常序列及椎间隙高度。随后,在预先规划的部位做两个直径 0.8 至 1.0 厘米的小切口,分别建立 UBE 的观察与操作通路,插入内镜与专用器械,依靠高清影像清晰显示椎管内部结构,逐步清除肥厚的黄韧带、增生的关节突及退变椎间盘组织,实现双侧椎管、侧隐窝和神经根管的充分减压。完成椎间植骨床制备后,植入自体骨或人工骨材料,并置入椎间融合器。最后,再次启用机器人导航系统对内固定物、融合器的位置以及复位效果进行验证,确认满意后冲洗创面并逐层缝合,结束手术过程。

目前国际上已有多个关于该技术临床应用的创新性研究报道,Suvithayasiri 等[10]提出在导航引导下的 UBE-TLIF 手术中采用双融合器植入的方法,借助导航实现高精度定位,成功达成单侧入路下对双侧椎间隙的支撑覆盖,显著降低融合器下沉的发生率,为复杂型腰椎滑脱病例的融合处理提供了新的解决方案。

(二) 相较于传统术式的核心技术优势

1. 置钉精准度大幅提升

机器人导航系统可实现亚毫米级的定位精度,置钉优良率(依据 Gertzbein-Robbins 分级为 A、B 级)高达 98.5%~99.5%,显著优于传统 UBE 手术中徒手操作所达到的 85%~92%。该技术大幅降低了螺钉穿出椎弓根的风险,有效避免了对神经根及腹主动脉等重要结构的损伤,尤其适用于解剖结构异常的脊柱滑脱病例[5]。Yang 等人[11]在病例报告中指出,所有接受机器人辅助 ULIF 手术的患者,其植入螺钉均达到 Gertzbein-Robbins A 级标准,实现了理想的置钉效果,进一步在国际范围内验证了该技术在操作精确性上的突出优势。

2. 微创创伤优势更显著

手术过程中仅需制作两个微小切口并辅以经皮置钉的穿刺入口,无需广泛剥离椎旁肌群,亦无需大范围切除椎板,术中失血量控制在 50~100ml 范围内。由于对周围组织的干扰较小,术后患者切口疼痛程度较轻,椎旁肌功能基本保持完整,从而显著降低了腰背部慢性疼痛及肌肉萎缩的发生风险[12]。He 等人[13]通过 meta 分析发现,相较于传统的 MIS-TLIF 技术,UBE 在减少术中出血和缩短住院时间方面具有更优表现,尤其在联合机器人导航应用时优势更为明显,原因在于机器人辅助下的经皮置钉可进一步减小对软组织的机械性损伤。

3. 滑脱复位与减压更可控

借助机器人导航系统在术中实时监控复位过程,可精准控制椎体的复位距离,避免复位不足或过度

矫正的发生。显微镜提供了清晰的术野, 便于从多角度充分实现椎管减压, 彻底解除神经受压状态, 其减压效果与开放手术相当, 同时具备更小的组织创伤[14]。国际研究指出, 采用“可视化减压联合导航复位”的策略, 显著克服了传统微创技术中“无法直视、定位不准”的局限, 为复杂性脊椎滑脱的微创化治疗开辟了可行路径[15]。

4. 手术安全性与康复效率提高

手术过程中无需反复使用 C 臂机进行透视, 使医患双方的辐射暴露量减少了 70%以上。该术式对机体造成的应激损伤较轻, 患者术后仅需卧床 1~2 天便可下地活动, 住院时间相应缩短 3~5 天, 腰椎功能恢复速度明显优于传统开放手术。据 Park 等人[7]报道, 采用机器人辅助的微创脊柱手术可使患者康复周期缩短 40%, 显著提升了临床治疗体验与术后感受。

5. 适应症范围逐步拓宽

相较于传统 UBE 技术, 机器人导航辅助下的 UBE 可应用于部分 III 度腰椎滑脱症病例, 以及多节段滑脱合并椎管狭窄、肥胖或高龄高风险人群, 从而拓展了手术适应证的覆盖范围[16]。Liu 等人[17]曾报告一例多节段腰椎滑脱伴椎管狭窄患者, 通过机器人辅助 UBE 完成治疗, 术后临床症状显著改善, 表明该技术在处理复杂、多节段病变方面具有实际应用潜力。

4. 机器人导航辅助 UBE 的手术操作规范与技术要点

(一) 术前准备与规划

术前需系统采集患者的病史信息, 并完成全面的体格检查与影像学评估, 以准确定位手术节段, 判断椎体滑脱程度, 识别椎管狭窄的具体位置, 评估骨质疏松状态, 同时对心肺及凝血功能进行检测, 确保无手术禁忌证存在[18]。将获取的影像资料导入机器人导航系统后, 由主刀医生联合工程师共同制定详细手术方案, 重新设定椎弓根螺钉的进钉路径、UBE 通道的安置位置以及融合器的型号选择; 针对滑脱椎体, 还需专项规划复位操作的角度与施力强度, 以降低术中误操作风险。此外, 须提前备齐所需器械与耗材, 包括骨科机器人装置、UBE 内镜设备、椎弓根螺钉系统及椎间融合器等, 并对所有设备进行预先调试, 保障其在手术期间稳定运行。

(二) 手术操作流程

全身麻醉实施后, 患者以俯卧位安置于脊柱手术专用托架, 确保腹部悬空以减少腹腔压力对脊柱的影响, 膝部与肘部使用软垫加以防护。通过调整体位使腰椎维持在中立位, 并借助 C 臂机进行初步透视, 核实体位无偏移, 防止其影响导航系统定位精度。

在机器人导航引导下完成配准及螺钉置入: 将定位支架固定于髂骨或棘突部位, 实现导航系统的注册与空间匹配。当系统确认配准误差处于可接受范围后, 调用已规划的进钉路径, 机械臂自动移动至预定进钉点, 在局部皮肤切开约 0.5 厘米切口, 逐层分离组织暴露骨面, 依次置入开路器与攻丝器械, 沿导航路径插入导针; 经实时透视结合导航界面双重验证导针位置准确后, 选择合适尺寸的椎弓根螺钉植入。重复上述步骤完成其余螺钉置入, 随后安装连接棒, 通过适度撑开恢复椎间隙高度, 实现滑脱节段的解剖复位[19]。

UBE 技术应用于镜下减压与融合过程: 在目标节段建立两个平行小切口, 采用钝性分离肌间隙形成观察通道与操作通道, 置入内镜并连接生理盐水持续冲洗系统, 维持术野清晰。镜下逐步操作: 首先清除周围软组织, 切除增厚的黄韧带, 磨除增生并向内聚拢的关节突结构, 扩大中央椎管及侧隐窝区域, 充分松解受压迫的神经根。继而切开纤维环, 取出退变的髓核组织, 刮除上下终板软骨面, 制备植骨床后于椎间隙前部填塞自体碎骨颗粒, 随后置入椎间融合器。再次通过内镜确认减压完整, 融合器居中放置, 未对神经根造成压迫[20]。

术后处理流程包括: 手术结束时以生理盐水冲洗创面, 检查是否存在脑脊液渗漏或活动性出血, 确认无异常后撤出工作通道, 逐层缝合切口并覆盖无菌敷料。患者返回病房后接受抗感染、脱水及营养神经等对症支持治疗; 术后 24 小时内可在佩戴腰围保护下行床轻微活动; 术后第 1 周开始接受专业指导下的腰背肌功能训练; 分别于术后 3 个月、6 个月和 12 个月按计划进行影像学随访, 评估椎体融合情况及脊柱整体稳定性[21]。

(三) 关键技术注意事项

1. 为确保置钉精度, 机器人导航配准过程必须高度准确, 配准误差须控制在 0.5 毫米以内, 防止因偏差造成置钉位置失准; 减少配准误差的专门技巧包含以下几点: ① 参考点标记物应优先选取棘突, 椎板, 髂后上棘这些骨性凸起部位, 并用骨钉式刚性标记架牢牢固定在骨骼表面, 不可仅仅依靠皮肤粘贴标记, 防止因皮肤滑动或者软组织牵拉致使标记发生位移; ② 肥胖患者的皮下脂肪层比较厚, 可以适当缩减标记架悬臂的长度, 增添固定的点位, 在手术过程中要维持患者体位完全静止, 麻醉之后利用体位固定带来加强躯干和下肢, 从而减轻呼吸以及身体轻微动作给导航追踪带来的影响; ③ 完成配准以后要展开多点复查, 挑选 3 到 5 个不同的解剖标志再次验证误差情况, 如果误差接近临界值, 则需重新执行注册配准。针对肥胖患者, 应调整定位支架的安置位置, 以降低软组织厚度对定位精度的干扰。

2. 滑脱复位应遵循“适度复位”原则, 重点在于恢复椎管空间并解除神经牵拉, 而非追求解剖结构的完全复位, 避免因过度矫正导致神经根受到损伤。

3. 镜下减压操作应按步骤逐步实施, 优先处理背侧黄韧带与关节突区域, 再对前方椎间盘进行干预, 严禁暴力操作以防脑脊液漏; 神经根管出口减压操作要点(UBE 镜下难点), 神经根管出口处在侧隐窝外侧, 椎间孔区域, 这里是神经根最容易被卡住的地方。其操作步骤为: 把内镜放在观察通道里, 视野偏向于外侧椎间孔区, 先用枪状咬骨钳慢慢去除增生的下位椎弓根上缘骨质以及增生的骨赘; 接着用射频电极来凝固并分离粘连的纤维结缔组织, 从而让神经根袖得到释放; 利用角度刮匙清除神经根腹面剩余的椎间盘组织和瘢痕, 整个过程要维持神经根处于“松弛, 游离”的状态; 针对增生内聚的上关节突外侧部分, 要用高速磨钻一层层打磨以扩充椎间孔外口, 执行的时候按照内镜所看到的神经根走向作为基准线, 器械一直要远离神经根一定距离, 并且多次移动神经根以确保没有受到挤压或者拉扯。神经根松解务必彻底, 尤其需重视神经根管出口部位的减压效果。

4. 终板处理需掌握合理程度, 保留其骨性结构完整性, 防止过度刮除引发融合器下沉; 同时确保植骨量充足, 以促进椎体间的有效融合。

5. 若术中遭遇导航系统故障、置钉偏离预定路径或发生严重脑脊液漏等情况, 应立即转换至常规 UBE 技术或开放手术方式, 保障手术安全性[22]。

5. 临床疗效研究进展与对比分析

(一) 围手术期指标对比

众多国内外开展的临床对照研究显示, 机器人导航辅助的 UBE 组(即观察组)在围手术期相关指标方面相较于传统开放手术组(即对照组)要好很多。依据国内研究的数据可知, 观察组术中的出血量是 173.6 ± 17.9 毫升, 对照组术中出血量为 332.1 ± 23.5 毫升; 观察组术后的引流量是 97.5 ± 13.8 毫升, 对照组术后引流量为 261.3 ± 19.8 毫升; 观察组的住院时间为 7.3 ± 1.8 天, 对照组住院时间是 10.0 ± 1.6 天, 经比较, 两组相关指标的差异均有统计学意义($P < 0.05$) [23]。

国际研究得出类似结论, 针对老年患者开展的回顾性研究显示, 机器人辅助的 UBE-LIF 组平均手术时间为 105.3 ± 25.8 分钟, 明显短于常规 UBE 组的 132.7 ± 31.2 分钟, 且术中出血量减少超六成。此情况证实机器人导航实施精准规划可有效减少术中反复调整的情形, 从而发挥缩短手术时间, 减轻创伤的作

用[24]。

(二) 置钉精准度

一项国内多中心回顾性研究纳入 110 例腰椎滑脱患者, 随机分为两组, 每组各 55 例, 分别接受机器人导航辅助单侧双通道(UBE)手术与常规 UBE 手术。数据显示, 机器人导航组在置钉优良率方面达到 96.36%, 高于常规组的 81.82%。统计分析表明, 上述指标在两组间差异具有显著性($P < 0.05$) [25]。

国际范围内, Kim 等(2023)的研究进一步证实, 采用机器人导航进行脊柱置钉的准确率为 99.2%, 明显优于徒手操作所实现的 92.1% [26]。尤其在解剖结构存在变异的病例中, 导航系统的优势更为显著。其高精度定位能力有效降低了因螺钉偏移所致的神经损伤和内固定松动等并发症风险, 同时提升了滑脱节段的复位质量, 为术后脊柱稳定性恢复提供了可靠保障。

(三) 腰椎功能与疼痛改善效果

在临床评估中, 视觉模拟评分(VAS)、Oswestry 功能障碍指数(ODI)以及日本骨科协会(JOA)腰椎功能评分被广泛用于衡量手术效果。研究数据显示, 两组患者在术前各项评分上无显著差异($P > 0.05$); 术后 1 周、3 个月及 6 个月的随访表明, 两组的 VAS、ODI 评分均较术前明显改善。

至术后 6 个月, 观察组的 VAS 评分由 6.9 ± 1.8 分下降至 2.1 ± 0.8 分, ODI 从 $57.8\% \pm 8.9\%$ 降至 $18.6\% \pm 4.7\%$; 同期对照组的相应数值为 VAS 3.7 ± 2.1 分、ODI $20.8\% \pm 5.1\%$ [23]。国际范围内的病例报告支持上述发现, 例如 Yang 等[11]记录的病例显示, 患者术后第 3 天 VAS 评分由 7 分减至 2 分, ODI 亦从 68% 下降至 22%, 提示该技术在缓解疼痛与恢复功能方面具有快速起效的特点。

长期随访结果显示, 在术后 12 至 24 个月期间, 观察组椎间融合率达到 92.6%, 滑脱复发率仅为 2.8%; 相比之下, 对照组融合率为 81.7%, 复发率为 9.3%, 表明观察组在远期疗效上的稳定性与可靠性更优。He 等人[13]的 meta 分析指出, UBE 技术与传统 MIS-TLIF 在远期融合率上无统计学差异, 但联合机器人导航后, 融合率呈现上升趋势, 这一现象可能归因于复位精度的提升及融合器植入的准确性。

(四) 并发症发生率对比

采用机器人导航辅助的 UBE 手术组, 其并发症发生率显著低于传统术式应用情况。术后观察组的并发症发生范围为 2.7% 至 3.2%, 主要表现为轻度脑脊液漏和浅表切口感染, 经针对性处理后均顺利康复; 相比之下, 对照组的并发症率介于 12.1% 与 14.5% 之间, 涵盖神经损伤、脑脊液渗漏、手术部位感染、内固定松动及融合器位置偏移等多种问题, 部分病例甚至需接受二次手术治疗。

根据国际研究数据, 借助机器人系统实施的微创脊柱手术可使并发症风险下降超过 60%, 这一改善主要得益于高精度定位能力与术中可视化技术的结合, 从而有效规避操作盲区带来的潜在危险, 详见文献[15]。以椎弓根螺钉置入为例, 机器人导航能够实时追踪螺钉行进路径, 防止其突破椎弓根结构进而损伤邻近神经根, 此项功能构成了该技术临床安全性的重要基础。

6. 现存问题与局限性

(一) 治疗成本偏高, 普及难度大

骨科手术机器人及其配套导航系统的采购成本较高, 同时专用螺钉、融合器等耗材价格也明显高于常规微创手术材料, 导致整体治疗费用居高不下。这一经济负担限制了部分基层医疗机构的引入意愿, 也让经济条件有限的患者难以承担, 从而制约了该技术在资源相对匮乏地区的推广应用。类似情况在国际范围内亦有体现, Kim 等人[26]强调, 高昂的设备购置费用是阻碍此类系统在发展中国家普及的核心障碍。

(二) 技术门槛高, 学习曲线漫长

掌握该项技术要求术者兼具多方面能力: 不仅需熟悉骨科机器人导航的操作流程, 还需具备扎实的脊柱解剖学知识、丰富的内镜操作经验以及对 UBE 技术的熟练掌握。初学者通常需要经历系统化培训,

并积累 30 至 50 例手术实践后, 方可掌握完整操作流程, 其学习周期较传统 UBE 手术更长。早期阶段常伴随手术时间延长、定位误差等问题。国外研究亦证实, 双技术叠加带来的操作复杂性构成推广瓶颈, 建立统一规范的培训机制已成为推动技术落地的关键举措[27]。

(三) 部分复杂病例应用受限

在面对特定复杂病情时, 该技术的应用受到明显限制。例如严重骨质疏松(T 值低于-3.5)、III度以上腰椎滑脱、显著脊柱畸形或因肥胖导致体表标志难以辨识的患者, 机器人导航的精度可能下降, 影响螺钉置入的稳定性与复位效果, 最终影响临床疗效[28]。因此, 此类病例仍推荐采用开放手术方式处理。目前该技术主要适用于单节段、轻度滑脱等相对简单的病理情况, 对于更复杂病变的应用仍处于探索阶段。

(四) 设备依赖度高, 术中存在突发风险

整个手术过程高度依赖机器人导航与内镜系统的正常运行, 一旦术中发生设备故障、电力中断或配准失败等突发状况, 必须立即转为传统手术模式继续操作。这种潜在风险对手术团队的传统技术功底和应急处置能力提出更高要求。由此可见, 专业人员必须具备稳固的传统外科基础, 避免对设备形成单一依赖, 以确保能够在各类突发情境下保障手术安全与连续性。

(五) 技术应用的争议与挑战

1. 与其他主流微创技术的优劣势对比

当下, 脊柱微创领域存在显微镜下通道技术, OLIF, XLIF 等诸多成熟术式, 这些技术针对腰椎滑脱合并椎管狭窄的不同亚类病例时各有长短, 从而引发临床应用方面的争议。

(1) 对比显微镜下通道微创技术: 显微镜下通道技术与机器人导航辅助 UBE 相比, 其核心优势体现在双通道视野更为开阔, 减压角度更具灵活性, 能够达成对双侧椎管, 侧隐窝以及神经根管的全面减压效果, 针对存在混合型椎管狭窄, 关节突严重增生内聚情况的 I~II 度滑脱患者来说, 这种技术的适配性更强一些。而且采用经皮置钉并结合内镜操作时, 软组织剥离量会有所缩减, 不过从劣势来看, 显微镜下通道技术的学习难度小很多, 设备成本也要低很多, 手术过程中器械配合也较为简单, 对于单纯中央型椎管狭窄, 滑脱程度较轻而且解剖结构没有明显变异的患者而言, 手术效率更高一些; 但是 UBE 对术者的内镜操作能力有着更高的要求, 再加上机器人系统使得整个流程变得更加繁杂。

(2) 对比 OLIF/XLIF 技术: OLIF/XLIF 属于侧方入路椎间融合技术, 其长处在于不必踏入椎管, 也不会影响到神经根和硬膜, 针对那些椎间隙塌陷严重, 要大幅重建椎间隙高度以及脊柱冠状位序列滑脱的情况, 它的融合与矫正效果十分明显, 特别适宜患有腰椎侧凸的病人。不过这种技术不能做到后路椎管直接减压, 如果病人主要表现为中央椎管, 侧隐窝骨性狭窄或者黄韧带肥厚卡压等症状, 就应当配合后路减压, 这样手术造成的伤害就会变大很多, 而且耗时也会延长, 机器人导航助力下的 UBE 属于后路入路, 可以一次性完成减压, 复位, 置钉, 融合这些步骤, 从而解决滑脱加椎管狭窄这两个难题, 所以是混合型狭窄病人的理想选择; 但是当椎间隙塌陷非常厉害, 冠状位畸形也很突出的时候, 它的复位和矫正能力就比不上侧方入路技术了。

综上, 临床争议集中在术式选择标准: 目前尚无统一指南界定三类技术的绝对适用边界, 部分轻症滑脱患者存在多种术式可选的情况, 选择多依赖术者个人技术擅长与习惯。

2. 特殊人群导航精度漂移风险及应对策略

骨质疏松、脊柱解剖变异是导致导航系统精度漂移的两大核心诱因, 也是临床应用中难以规避的挑战。

(1) 骨质疏松患者(T 值 < -2.5): 此类患者椎骨骨密度减小, 骨皮质变薄, 骨小梁稀疏, 其一, 术中骨性标记点容易产生微骨折, 塌陷, 致使导航配准基准发生偏移; 其二, 椎弓根骨质强度不够, 机械臂抵靠, 器械操作产生的轻微外力就会引起骨骼微动, 从而造成螺钉路径导航出现偏差, 轻则置钉位置偏

移, 重则出现螺钉切割骨质, 内固定松动的情况。应对策略为: ① 术前准确评定骨密度, 针对中重度骨质疏松患者预先计划, 首先采用加长且直径更大的椎弓根螺钉, 并配合骨水泥加强椎弓根; ② 缩减导航机械臂的支撑力度以减轻骨骼受压微动; ③ 在配准时增多骨性参考点的数量, 手术过程中每完成一枚螺钉置入之后立即复查导航精度; ④ 对于 T 值小于 -3.5 的重度骨质疏松患者要严格控制适应症, 慎重选择此种术式。

(2) 解剖变异患者: 椎弓根纤细, 椎弓根缺失, 滑脱致使解剖标志完全移位, 腰骶段存在先天畸形等情况时, 术前三维建模与术中实际解剖的契合度会变差, 产生系统性精度偏移, 应对策略包含: ① 术前利用薄层 CT, 三维重建影像多次分析变异结构, 并针对个体情况规划螺钉路径, 避开畸形部位; ② 不再依靠单个棘突/骶骨标记, 转而采取多部位联合配准模式; ③ 术中借助 C 臂透视执行双重确认, 导航只是主要参照物, 并非唯一依据; ④ 对于变异极为复杂的病例, 则直接转为传统手术。

3. 全流程辐射暴露分析(术前 CT + 术中透视)

该技术大幅缩减了术中 C 臂透视频率, 不过术前要执行腰椎薄层 CT 扫描, 这使得整体辐射暴露问题被临床探讨起来, 很有必要把传统 C 臂引导的 UBE 以及开放手术在辐射剂量方面做定量对比。

(1) 辐射来源拆解: 机器人导航辅助 UBE 的辐射形成包含两部分, 其一为术前规划阶段的腰椎薄层 CT, 单部位扫描的有效辐射剂量大约是 4.0 到 6.5 mSv; 其二为术中辅助透视, 主要用来做配准验证和术后评定, 一般只需 3 到 5 次, 每次 C 臂透视剂量很低, 合计贡献大概 0.2 到 0.5 mSv, 所以整个过程的总辐射剂量范围大致在 4.2 到 7.0 mSv 之间。

(2) 传统 C 臂引导常规 UBE/开放手术: 传统 C 臂引导下的常规 UBE 或者开放手术, 并非依靠术前专门的薄层 CT, 其辐射源集中在术中的多次透视操作上, 因为要不断确认导针, 螺钉以及融合器的位置, 所以术中的透视次数常常达到 20 到 40 次, 总的辐射累积量大约在 6.0 到 9.0 mSv。

(3) 综合比较显示, 机器人导航辅助 UBE 的整体辐射水平比传统 C 臂引导方式稍低一些, 特别是在多节段病变或者术中要频繁调整的复杂病例当中, 它的辐射控制优势表现得更加明显, 但是仍然存在争议: 术前单次薄层 CT 造成的集中辐射可能会让患者以及部分医务人员感到忧虑; 而且对于那些解剖结构正常, 只需要简单置钉的轻症患者来说, 是否值得专门为导航系统再安排一次 CT 扫描, 有人会质疑这种“附加辐射”是否合理, 可行的改良途径在于: 最大限度利用已有的影像资料, 如果患者术前已经做过腰椎三维 CT 检查, 就不要再重复采集; 还可以调整扫描协议, 采取低剂量薄层 CT 模式, 从而进一步减小术前的辐射输出。

7. 发展展望

(一) 技术智能化与一体化升级

骨科手术机器人的未来发展方向在于结合人工智能及大数据技术, 从而做到对手术路径的自动改良, 并在术中执行即时的自我适应性调节, 以此来加强定位的准确性并改善操作的效率, 而且还要研发出机器人与内镜一体化的设备, 达成导航, 内镜和操作器械之间的紧密衔接, 这样就能精简手术流程, 缩减手术时间[29]。从国际层面看, 当前的研究已着手探究 AI 辅助手术规划方面的课题, 借助大数据实施学习之后, 机器人能够自行达成解剖结构的识别, 并据此改良手术路径, 从而进一步加强手术的精准程度以及运行效率[30]。

(二) 设备成本降低与基层普及

随着国产骨科机器人研发不断深入并迈向量产阶段, 其设备与耗材成本逐步下降, 轻巧便携且具备小型化的导航机器人将会被应用于临床当中, 这些机器人很合适基层医院执行相关任务, 从而推动这项技术向基层蔓延, 使得更多病人得以享受到精准微创疗法带来的好处。从国际上看, 低成本导航机器人

的研发正在推进当中, 日后大概会解决成本过大的问题, 从而让这项技术惠及更多病人。

(三) 适应症进一步拓宽

把 3D 打印个性化导板, 术中超声导航以及骨质疏松加强技术融合起来, 来改善手术方案, 这样就能提升严重骨质疏松, 脊柱畸形这些复杂病例的手术合适程度, 还能扩大机器人导航辅助 UBE 的适应症范围[31]。举例来说, 利用 3D 打印制作出的个性化融合器, 其形状会更好地适配患者的椎间隙形态, 从而提升融合的可能性, 而且还可以解决骨质疏松患者出现的融合器下沉问题。

(四) 多中心大样本研究完善诊疗规范

当下的这项技术在临床上的研究多为单中心的小样本回顾性研究, 日后要展开多中心的大样本前瞻性随机对照研究来进一步证实其长期效果, 并制订出标准的手术操作规程, 适应症判定准则以及复健流程, 这样才能促使该项技术得以规范地推广。国际上一些研究团队正在执行多中心临床研究项目, 目的在于制定这种技术的统一诊疗规范。

(五) 加速康复外科(ERAS)理念深度融合

把 ERAS 理念同机器人导航辅助的 UBE 技术融合起来, 创建起一个覆盖术前精确评定, 术中微创手术, 术后早期复健以及疼痛细致调控在内的综合诊疗体系, 这样就能进一步减小手术带来的应激反应, 缩减复健所需的时间, 从而改善患者在接受治疗时的感受[32]。这也是未来脊柱外科发展的走向, 利用多模式改良手术方法来做到病人快速恢复的目的。

8. 结论

机器人导航辅助 UBE 技术属于脊柱外科微创领域的革新之举, 它把骨科机器人的精确导航长处同 UBE 技术的微创操作长处紧密结合, 与腰椎滑脱伴有椎管狭窄的手术治疗方法十分贴合, 在准确植入钉子, 可控制完成复位, 全面执行减压以及做微创融合等方面有着突出的优势, 临床研究表明, 这种术式用来诊治腰椎滑脱并存在椎管狭窄的情况时, 围手术期间各项指标表现良好, 钉子植入非常精准, 腰椎功能得以较好地康复, 并发症发生的几率较低, 长期效果比较稳定, 相比于传统的开放式手术和一般的 UBE 手术而言, 具备独特的临床意义。

当下该技术存在一些不足, 比如设备成本较高, 学习难度大, 对于特殊病例的适配性差等, 不过随着技术不断升级, 国产设备慢慢推广应用, 临床经验慢慢积累起来, 诊疗规范渐渐变得更为完备, 那么机器人导航辅助的 UBE 技术就会慢慢变成一种被优先考虑的微创手术方法, 用来医治腰椎滑脱并伴有椎管狭窄的情况, 在各级别的医院里都能得到广泛的应用。临床医生要严格把好手术适应症这道关, 熟练掌握技术操作的重点之处, 并按照患者的实际情况制定个性化的计划, 这样才能最大限度地凸显出这项技术的优势, 给那些得了腰椎滑脱又加上椎管狭窄的病人赋予既安全又高效而且还是微创的治疗途径, 从而促使脊柱外科微创诊疗技术朝着精确化, 智能化以及大众化方面去发展。

参考文献

- [1] Jacobsen, S., Sonne-Holm, S., Røvsing, H., Monrad, H. and Gebuhr, P. (2007) Degenerative Lumbar Spondylolisthesis: An Epidemiological Perspective: The Copenhagen Osteoarthritis Study. *Spine*, **32**, 120-125. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000250979.12398.96>
- [2] 中华医学会骨科学分会骨科康复学组, 中国医师协会骨科学分会脊柱感染学组. 退行性腰椎滑脱症诊疗指南 (2025 年版) [J]. 中华骨科杂志, 2025, 45(5): 261-270.
- [3] Gatam, A.R., Gatam, L., Mahadhipta, H., Ajiantoro, A., Luthfi, O. and Aprilya, D. (2021) Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion: A Technical Note and an Outcome Comparison with the Conventional Minimally Invasive Fusion. *Orthopedic Research and Reviews*, **13**, 229-239. <https://doi.org/10.2147/orr.s336479>
- [4] Yi, M., Song, J., Zhang, Y., Lin, W., Yao, M., Fan, Y., et al. (2023) Effects of Tracer Position on Screw Placement

- Technique in Robot-Assisted Posterior Spine Surgery: A Case-Control Study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **24**, Article No. 421. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06547-y>
- [5] Fang, G., Zhang, J., Zhu, H., Lai, X., Wu, J., Li, X., *et al.* (2025) Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion Assisted by a Tianji Robot for Lumbar Degenerative Disease in Elderly Patients: A Retrospective Study. *European Journal of Medical Research*, **30**, Article No. 231. <https://doi.org/10.1186/s40001-025-02433-6>
 - [6] 毛兆光, 范顺武, 赵凤东, 等. 退行性腰椎滑脱黄韧带病理组织学和免疫组化的观察[J]. 中国骨伤, 2005, 18(1): 32-34.
 - [7] Park, S.M., Kim, H.J. and Yeom, J.S. (2024) Is Minimally Invasive Surgery a Game Changer in Spinal Surgery? *Asian Spine Journal*, **18**, 743-752.
 - [8] 中国康复医学会骨质疏松预防与康复专业委员会, 中国老年保健协会骨科微创分会. 退行性腰椎管狭窄症诊疗专家共识[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2023, 16(2): 97-103.
 - [9] Sharif, S., Shaikh, Y., Bajamal, A.H., Costa, F. and Zileli, M. (2020) Fusion Surgery for Lumbar Spinal Stenosis: WFNS Spine Committee Recommendations. *World Neurosurgery*: X, **7**, Article 100077. <https://doi.org/10.1016/j.wnsx.2020.100077>
 - [10] Suvithayasiri, S., Kim, Y., Liu, Y., Lee, C., Vasant Khandge, A. and Kim, J. (2024) Placement of 2 Cages Using Navigation-Guided Biportal Endoscopic Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: Illustrative Case. *Journal of Neurosurgery: Case Lessons*, **8**, CASE23512. <https://doi.org/10.3171/case.23512>
 - [11] Yang, H., Chen, W., Zhao, H., Zhang, W., You, X., Zhang, C., *et al.* (2022) Robot Assisted Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion for Lumbar Spondylolisthesis: A Case Report. 2022 *Asia Conference on Advanced Robotics, Automation, and Control Engineering (ARACE)*, Qingdao, 26-28 August 2022, 166-170. <https://doi.org/10.1109/arace56528.2022.00037>
 - [12] Liu, G., Liu, W., Jin, D., Yan, P., Yang, Z. and Liu, R. (2023) Clinical Outcomes of Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion (ULIF) Compared with Conventional Posterior Lumbar Interbody Fusion (PLIF). *The Spine Journal*, **23**, 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2022.10.001>
 - [13] He, Y., Cheng, Q. and She, J. (2024) Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion versus Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion for Single-Segment Lumbar Degenerative Disease: A Meta-Analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **25**, Article No. 1289. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-08046-0>
 - [14] Huang, X., Gong, J., Liu, H., Shi, Z., Wang, W., Chen, S., *et al.* (2022) Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion Assisted by Intraoperative O-Arm Total Navigation for Lumbar Degenerative Disease: A Retrospective Study. *Frontiers in Surgery*, **9**, Article 1026952. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.1026952>
 - [15] Kim, C.W. and Phillips, F. (2021) The History of Endoscopic Posterior Lumbar Surgery. *International Journal of Spine Surgery*, **15**, S6-S10. <https://doi.org/10.14444/8159>
 - [16] Garufi, G., Conti, A. and Cardali, S. (2025) Robotic Guidance in Posterior Transdiscal Fixation for High-Grade Spondylolisthesis: A Case Series. *Journal of Spine Surgery*, **11**, 998-1006. <https://doi.org/10.21037/jss-25-122>
 - [17] Liu, Y.D., Xu, D.F., Deng, Q., *et al.* (2023) Treatment of Lumbar Disc Herniation with Robot Combined with Unilateral Biportal Endoscopic Technology: A Case Report. *World Journal of Clinical Cases*, **12**, 3235-3242.
 - [18] Lee, J., Kim, S., Kim, Y.S. and Chung, W.K. (2012) Optimal Surgical Planning Guidance for Lumbar Spinal Fusion Considering Operational Safety and Vertebra-Screw Interface Strength. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **8**, 261-272.
 - [19] 苏全健, 孙宇, 齐晓志. 基于机器学习的机器人辅助椎弓根植钉规划[J]. 集成技术, 2018, 7(3): 42-53.
 - [20] 韩振川, 任博文, 刘庆祖, 等. 经皮脊柱内镜腰椎微创融合术的临床研究进展[J]. 解放军医学院学报, 2021, 42(9): 970-973+987.
 - [21] 北京慢性病防治与健康教育研究会单侧双通道脊柱内镜专业委员会. 单侧双通道内镜技术腰椎全身麻醉手术围手术期加速康复临床实施和管理专家共识[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2025, 18(10): 865-879.
 - [22] Song, J., Liu, S., Yao, S., Zhang, Y., Lin, W. and Ding, L. (2026) Navigation-Assisted vs Robot-Assisted Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion for Single-Level Lumbar Degenerative Disease: A Retrospective Comparative Study. *Videosurgery and Other Miniinvasive Techniques*, **21**, 91-99. <https://doi.org/10.20452/wiitm.2026.18019>
 - [23] Cui, G.Y., Han, X.G., Wei, Y., Liu, Y.J., *et al.* (2021) Robot-Assisted Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion in the Treatment of Lumbar Spondylolisthesis. *Orthopaedic Surgery*, **13**, 1960-1968. <https://doi.org/10.1111/os.13044>
 - [24] Yi, H., He, S.Y., Zhang, S.L., Liu, P., *et al.* (2024) Robot-Assisted Unilateral Biportal Endoscopic Lumbar Interbody Fusion for the Treatment of Single-Level Degenerative Lumbar Spondylolisthesis: Ipsilateral Direct with Contralateral Indirect Decompression. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **27**, Article No. 227.

- [25] 于超, 王静杰, 陈晓艳, 崔致尧, 王磊升, 丁岩, 刘勇君, 张贺庆. 骨科机器人辅助单侧双通道内镜技术对腰椎滑脱患者功能恢复的效果[J]. 中华实验外科杂志, 2025, 42(4): 755-757.
- [26] Kim, J. and Lee, C. (2023) Robotic Spine Surgery: Current Status and Future Directions. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **38**, 145-154.
- [27] Yu, Y., Li, Z.Z. and Nishimura, Y. (2022) Editorial: Endoscopic Spine Surgery. *Frontiers in Surgery*, **9**, Article 1127851. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.1127851>
- [28] 中国医师协会骨科医师分会脊柱微创学组. 双通道脊柱内镜技术临床应用专家共识(2024 版) [J]. 中华医学杂志, 2024(47): 4289-4296.
- [29] 保毅, 罗浩天, 李维朝, 等. 机器人辅助脊柱外科手术的应用进展[J]. 中华骨科杂志, 2024, 44(13): 900-905.
- [30] Martinez-Soler, P. and Martinez-Canca, J.F. (2024) Overview of Minimally Invasive Nerve Root Decompression Compared to Traditional Microdiscectomy and Foraminotomy Techniques: Present and Future of Spinal Microsurgery. *Journal of Neurology & Stroke*, **14**, 202-208. <https://doi.org/10.15406/jnsk.2024.14.00609>
- [31] Lee, D.H., Lee, J.Y., Kim, S.B., Park, C.K., Lim, K.T., Lee, D.C., *et al.* (2025) Use of Double Cages for Biportal Endoscopic Transforaminal Lumbar Interbody Fusion: A Comparison of 3-Dimensional-Printed Titanium and Polyetheretherketone Cages. *International Journal of Spine Surgery*, **19**, 611-624. <https://doi.org/10.14444/8788>
- [32] 陈超, 柳根哲, 尹辛成, 等. 腰椎后路减压融合术结合加速康复外科理念在老龄腰椎退行性疾病中的应用[J]. 颈腰痛杂志, 2023, 44(4): 666-668.