

腰椎椎弓根螺钉内固定技术研究进展

楚岩东*, 杨开舜#

大理大学临床医学院, 云南 大理

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月5日

摘要

腰椎退行性疾病常始于椎间盘的退变, 纤维环破裂损伤后椎间盘突出会导致椎间盘高度降低、关节突关节增生、椎管狭窄, 继而引发神经根及硬膜囊受压出现腰腿痛, 严重影响患者生活质量甚至致残。腰椎的退行性病变包括腰椎间盘突出症、腰椎椎管狭窄症、腰椎不稳、腰椎滑脱症以及退变性脊柱侧弯。有研究报道腰椎退行性疾病总患病率高达27.3%, 其中女性高于男性(女性34.7%, 男性18.1%), 且近年来随着人口老龄化程度的加剧, 腰椎退行性疾病患病率也逐渐上升, 75岁以上高年龄患者占比超50%。在治疗腰椎退行性疾病的众多术式中, 椎弓根螺钉内固定系统具有即刻重建脊柱稳定性、实现三柱固定、矫形力量强大、减少假关节发生率及提高融合率等优势, 在腰椎融合技术中起着不可或缺的作用。本文以腰椎椎弓根螺钉内固定技术的发展及相关固定技术的优势及不足作一篇综述。

关键词

腰椎退行性疾病, 椎弓根螺钉, 内固定, 研究进展

Research Progress in Lumbar Pedicle Screw Internal Fixation Techniques

Yandong Chu*, Kaishun Yang#

Clinical Medical College of Dali University, Dali Yunnan

Received: January 3, 2026; accepted: January 28, 2026; published: February 5, 2026

Abstract

Degenerative lumbar diseases often originate from intervertebral disc degeneration. After annular fibrosus rupture and injury, disc herniation leads to reduced disc height, zygapophyseal joint hyperplasia, and spinal canal stenosis, which subsequently causes compression of nerve roots and the

*第一作者。

#通讯作者。

dural sac, resulting in low back and leg pain. This significantly impacts patients' quality of life and may even lead to disability. Degenerative lumbar pathologies include lumbar disc herniation, lumbar spinal stenosis, lumbar instability, lumbar spondylolisthesis, and degenerative scoliosis. Studies have reported that the overall prevalence of degenerative lumbar diseases is as high as 27.3%, with a higher incidence in women than in men (34.7% in women, 18.1% in men). In recent years, with the intensification of population aging, the prevalence of degenerative lumbar diseases has gradually increased, with patients over 75 years old accounting for more than 50% of cases. Among the various surgical techniques for treating degenerative lumbar diseases, the pedicle screw internal fixation system offers advantages such as immediate reconstruction of spinal stability, three-column fixation, powerful corrective force, reduced pseudarthrosis rates, and improved fusion rates. It plays an indispensable role in lumbar fusion techniques. This article provides a review by examining the development of lumbar pedicle screw internal fixation technology and discussing the advantages and limitations of related fixation techniques.

Keywords

Degenerative Lumbar Disease, Pedicle Screw, Internal Fixation, Research Progress

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. 椎弓根螺钉内固定技术的发展

1891年 Hadra [1]对脊柱损伤(椎体骨折脱位)和脊柱结核(Pott's disease)的患者首先使用铁丝缠绕棘突进行内固定的方法; 1948年 King [2]通过关节突关节螺钉实现腰椎内固定的使用技术, 促进脊柱融合, 试于退变性腰椎疾病, 以上研究均未成功。1949年 Michele [3]首先描述了腰椎椎弓根的解剖形态, 提出利用椎弓根作为安全通道直接进入椎体的后路手术方法, 取得活检标本。Harrington [4]系统地介绍了一种内固定系统(Harrington棒)用于脊柱侧弯的矫正治疗, 开创了内植物作为矫正脊柱畸形并实现固定融合的先河, 但远期发生平衡失代偿等并发症较多。1959年 Boucher [5]首次使用椎弓根螺钉经后方路径贯穿椎弓根并进入椎体进行固定。1982年 Luque [6]提出了“脊柱阶段性”概念, 并建立了椎板下节段钢丝及 Luque Rod 的脊柱内固定术。Luque 手术使用多节段椎板下钢丝在水平面上把脊椎移向中线而纠正冠状面或矢状面畸形, 优点是可以在额状面侧凸畸形的同时较好地重建矢状面上的平衡, 内固定坚强; 缺点是无凹向撑开力而纠正度数小, 椎板下穿钢丝有神经并发症可能。1983年 Denis 对 412 例胸腰椎骨折进行回溯性研究后, 将传统的“二柱理论”发展为“三柱理论”, 即脊柱可分为“前、中、后三柱”, 脊柱的稳定性不仅依赖于后柱, 更依赖于中柱的完整性, 只要中柱保持完整, 脊柱就是稳定的, “中柱”对脊柱的稳定性起到关键的作用。1983年 Steffee [7]推出了第一款广泛应用、允许螺钉多角度选择性的椎弓根螺钉-钢板系统, 在保证坚固内固定的前提下, 极大地提升了手术的灵活性和适应性。1986年 Roy-Camille [8]系统性地提出并阐述了椎弓根螺钉-钢板内固定系统用于脊柱创伤的内固定治疗, 并获得良好的效果, 将椎弓根螺钉-钢板系统广泛应用于临床。1993年和 1996年北美脊柱学会正式认可了椎弓根螺钉在临床的使用。以 PS 为基础的脊柱矫形固定系统不断被研制开发, 用于临床, 取得了良好的效果, 极大地推动了脊柱外科的发展。

2. 传统徒手置钉

徒手椎弓根螺钉置入技术在脊柱外科手术中不依赖术中辅助设备, 而凭借解剖标志将椎弓根螺钉置

入椎弓根的手术技巧。在辅助设备还未开展普及之初, 徒手置钉技术是脊柱外科医生的必备核心技能。其操作主要依赖于对解剖结构的直接识别与定位。在开放后路手术中, 通常需要沿棘突及椎板行骨膜下剥离, 充分显露关节突等后方结构, 并清除周围软组织以获得清晰视野。成功置钉需精准把握三个关键参数: 置钉点、置钉方向以及置钉深度。

2.1. 置钉点

徒手置钉技术高度依赖术者的视觉、触觉反馈及空间想象力来定位解剖标志并确定进钉点, 对手术经验要求极高。基于长期实践, 国内外学者已提出多样化的进钉方法[8]-[12]。置钉的方法包括 Roy-Camille 法: 以横突中部水平线与关节突关节纵向中心线的交点下 1 mm 为进钉点, 螺钉与椎体上下终板平行, 不向内侧成角, 与矢状面平行, 适用于 L1 和 L2。人字嵴顶点法: 位于副突嵴斜行与峡部嵴汇合处形成类似于人字形状。已广泛适用于 L1~L4。由于人字嵴在 L5 有 19% 的变异, 局部变浅显示不清, 而不能精确定位置钉点[13] Magerl 法: 采用向内或前内进钉法, 以上关节突外缘的纵垂线与横突中轴线的交点为进钉点, 进钉方向与椎体终板平行, 与矢状面向内成角约 15°。该置钉点较前两种方法更偏外、偏上, 用于作为 L3 至 L5 的置钉点更为安全, 特别是对 L5 最为使用。Krag 法: 采用向上方向法, 进钉点较法更靠外, 其水平线为横突的上 2/3 与下 1/3 之交线, 进钉方向朝上, 以不冲破上终板为度。单云官十字法: 纵线为上位椎骨下关节突下缘中点的纵垂线; 横线为横突背侧面的、与横突长轴相平行略高起的横突嵴, 在胸椎位于横突后面的上部、上位椎骨下关节突的下方, 腰椎位于横突后面中部。进钉方向为下胸椎及 L1~4 向内与矢状面成 2°~5°左右, L5 则为 15°。唐天驷法: 进钉点在胸椎为自小关节的下缘和小关节中心交点的外侧处划一垂线与自横突基底上方 1/3 处处划一水平线的交点, 在腰椎为自上关节突外侧缘作一垂线与横突中轴水平线的交点。进钉方向为向前内倾斜与矢状面成 15°以增加骨 - 螺钉接触面。

2.2. 椎弓根螺钉植入定向

在椎弓根螺钉内固定手术中, 要充分显露出置钉点, 持开路椎与矢状面(sagittal section angle, SSA)呈一定夹角, 钝性锥开椎弓根内的松质骨达到椎体, 沿着开路椎的方向扩大钉道, 用探针探查, 确定钉道的五个壁(前壁、上壁、下壁、外侧壁、内侧壁)完整, 则在攻丝后沿钉道方向拧入椎弓根螺钉。有文献发现横向角度从 L1 到 L5 逐渐增大, 矢状面的角度, 最大角度在 L1, L5 的最小[14]。Mitra 等[15]通过 X 线片和电脑断层扫描方法研究了 20 具尸体结果一致。Zindrick 测得在横断面上腰椎中 L1 的内倾角最小平均为 10.9°, L5 内倾角最大平均为 29.8°。由于个体的差异, 术前行影像学检查并评估椎弓根情况非常重要。

2.3. 椎弓根螺钉植入深度

骨 - 螺钉通道长度, 又名椎弓根延长深度, 为椎弓根轴线长度(包括上关节突厚度)加上椎弓根轴线在椎体延长线的长度 Roy-Camille 使螺钉进入 50%~60% 的通道长度, 而 Magerl 将螺钉的植入深度被明确要求为螺钉尖端恰好达到或略微穿透椎体前缘皮质。Weinstein [9]研究表明, 椎弓根螺钉不应穿透椎体前缘皮质, 植入椎体内部(约 80% 深度)是最佳安全选择, 椎弓根螺钉系统 60% 的固定强度来自椎弓根内, 进入椎体松质骨增加 15%, 至椎体前方骨皮质但未穿透时又增加 16%, 若穿透椎体前缘皮质, 则增加 20%~25% (仅在增加 4%~6%)。Krag [16]对骨 - 螺钉钉道的 50%、80% 和 100% 分别进行生物力学测定, 发现螺钉在 50% 深度时的平均失效强度是 80% 深度时 75%~77%, 在 100% 深度时的强度是 80% 深度时的 124%~154%, 通过配对 t 检验, 这些差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。这表明增加椎弓根螺钉的插入深度可提高螺钉 - 椎骨界面的强度, 但同时也需要平衡可能增加的手术风险冲破椎体前方骨皮质有潜在性损伤神经、血管和脏器等重要结构的危险, 因此, Krag、唐天驷等主张以 80% 的骨螺钉通道长度为植入深度。

2.4. 徒手置钉安全性评估

由于传统徒手置钉术中无法直视椎弓根全部解剖结构是否有关节突变、增生和脊椎的畸形、变异, 以及脊柱特殊的解剖结构和邻近组织, 造成了椎弓根螺钉置钉困难, 甚至导致椎弓根螺钉误置。椎弓根螺钉误置不仅会导致椎弓根内固定系统稳定性下降, 影响其固定效果, 还会带来硬脊膜破裂、血管损伤、脏器损伤、马尾神经损伤、神经根损伤、椎弓根骨折、瘫痪等严重的并发症, 甚至危及患者生命。并非所有的椎弓根螺钉位置不良都会造成严重后果, 在 Ilkka、Gertzbein, SD, Robbins [17] [18] 等人研究中提到, 椎弓根螺钉穿破椎弓根壁小于 4 mm 相对安全。由此, 在椎弓根螺钉置钉准确性评估中, Gertzbein 分级被普遍接受, 该标准将椎弓根螺钉位置分为 5 级: 0 级, 螺钉位于椎弓根皮质内; I 级, 螺钉突破椎弓根骨壁, 但 ≤ 2 mm; II 级, 螺钉突破椎弓根骨壁 > 2 mm, 但 ≤ 4 mm; III 级, 螺钉突破椎弓根骨壁 > 4 mm, 但 ≤ 6 mm; IV 级, 螺钉突破椎弓根骨壁 > 6 mm。此外, 不同的脊柱节段以及不同穿透方位, 其评估标准又有所不同。Gertzbein 对 40 名接受后路椎弓根螺钉内固定手术的患者进行了回顾性研究, 共分析了 167 枚置入的椎弓根螺钉, 该研究发现 0 级占 71.9%; I 级占 9.6%; II 级占 9%; III 级占 4.8%; IV 级占 1.8%; V 级占 3.6%。Castro [19] 则报道腰椎节段椎弓根穿透率达到了 40%, 其中内侧穿透率占到 29%。

由此可见, 徒手置钉技术是一项安全、简便的脊柱外科常用技术, 但其应用效果与外科医生的临床经验、操作水平密切相关, 且存在较长的学习曲线。在脊柱退行性病变严重、翻修手术致正常解剖结构缺失、存在骨性变异或先天畸形的患者中, 由于骨性标志不清、解剖结构复杂难辨, 徒手置钉的安全性会明显下降, 这类情况则更适合采用影像引导或计算机导航技术来辅助完成置钉。

3. 术中 X 线透视技术

对于实施脊柱手术椎弓根螺钉内固定的患者, 术中 X 线透视是目前辅助椎弓根螺钉植入最普遍的影像学定位方法。通过正侧位透视提供二维图像可评估椎弓根螺钉植入的准确性, 对安全植入椎弓根螺钉有很大的帮助。Fu 等 [20] 在通过术中 X 线透视引导胸腰椎椎弓根螺钉植入报道中称, 利用透视植入椎弓根螺钉的准确性可达 93.2%。Carbone [21] 等回顾性评价 41 例胸椎、胸腰段脊髓损伤接受椎弓根螺钉固定的术中透视辅助技术, 共植入 126 枚螺钉, 总体椎弓根螺钉穿破椎弓根皮质突破率 12.7% (16/126), 其中仅 2.4% (3/126) 穿破内侧皮质, 认为胸腰椎椎弓根螺钉植入应用术中 X 线透视安全有效。然而该技术也存在明显局限其二维图像信息有限, 效果易受设备性能、操作者经验及肋骨、肩胛骨、等软组织遮挡的影响; 更突出的是患者和医生将接受大剂量的射线辐射, 射线辐射的计量取决于术中透视的次数和时间。

4. O 形臂透视三维导航辅助技术

O 形臂导航辅助技术通过在术中直接对手术部位进行三维扫描, 为术者提供实时三维图像, 也可以通过术中导航技术引导螺钉的置入。从而有效提升复杂脊柱病例中螺钉植入准确率, 减少内固定物相关并发症 [22] [23]。该系统突出优势在于, 术者完成所有螺钉的置入后, 可对手术部位进行再次扫描, 明确患者螺钉在椎体中的实际位置, 有无穿破皮质或损伤到重要结构, 及时调整螺钉位置, 从而提高了手术的安全性, 这是其他导航系统所不具有的。Knafo [24] 等人对 198 例患者共计 987 枚椎弓根螺钉进行研究。其中 123 例采用 O 形臂导航辅助技术 (663 枚螺钉), 75 例采用传统 C 形臂辅助 (324 枚螺钉)。O 形臂导航辅助下的置钉精准率 82.8% 高于 C 型臂准确性为 73.8%。O 形臂组的平均手术时间较术中 C 臂导航的病人平均手术时间明显缩短 (57.3 分钟 vs 66.1 分钟)。Silbermann [25] 等人将 67 位患者分为徒手组 (30 例; 152 枚螺钉) 和 O 形臂组 (37 例; 187 枚螺钉), 在此研究中, 徒手置钉组的准确率为 94.1%, 而 O 形臂导航辅助下的置钉准确率为 99%。有研究比较了 O 型臂和 C 臂在微创脊柱经孔腰椎椎间融合术中的辐射暴露, 表明 O 臂系统是安全的, 可以显著减少外科医生的辐射暴露。O 形臂导航辅助技术虽在提升置钉准确性与安全

性方面优势显著,但其应用仍存在多方面的局限性。首先,系统的精准性易受手术环境影响,如参考架可能因术中操作或血液污染而导致导航精度下降。其次,该技术整体成本高昂,不仅设备购置与维护费用昂贵,使其多限于大型医院使用,且术中部分耗材为一次性,直接增加了患者的医疗负担。此外,系统对手术室条件要求较高,需配备特定手术床并占用较大空间。在流程效率方面,系统准备时间较长,包括设备启动与连接等环节,且需配备经过专门培训的操作人员,这些都对其临床普及构成了实际限制。

5. 计算机辅助技术

计算机辅助技术也称为计算机导航技术(手术导航技术),计算机导航技术是近年来术中辅助技术研究的热点。其原理是首先将患者术前 CT 重建影像存入计算机,术中根据三维数据和脊柱结构做多点匹配。创造出三维虚拟环境引导术者置入内固定。其目的在于完善术前计划、减少失误,从而提高植入椎弓根螺钉的准确率。刘亚军[26]等使用 CT 导航辅助颈椎椎弓根钉置入,椎弓根钉满意率为 97.5%,患者术中、术后均未出现明显神经、血管并发症。王铀[27]等将 100 例需接受脊柱矫形手术的病人分为 CT 导航组和徒手置钉组,两组通过证实得出 CT 导航组椎弓根螺钉准确率 94.61%显著高于徒手置钉组 88.43%,其返修率(2.43%)低于非导航组(6.06%)。Laine 等[28]对 100 例患者进行 X 线透视辅助下置入椎弓根螺钉和计算机辅助导航下胸椎和胸腰段椎弓根螺钉置入技术对比研究。两种方法各应用于 50 例患者。发现在传统方法中 13.4%的椎弓根钉穿破椎弓根皮质,计算机辅助导航技术中椎弓根钉穿破椎弓根皮质为 4.6%计算机辅助技术可以明显提高置钉的准确性。然而,该技术也存在局限性,包括学习曲线较长、设备昂贵、操作耗时,并且术中持续影像监测会带来显著的辐射暴露,这些因素在一定程度上限制了其在临床的广泛推广。

6. 术中神经电生理监测技术

术中神经电生理监测包括监护脊髓的躯体感觉诱发电位(SSEP),和运动诱发电位(MEP)监护神经根的皮节体感诱发电位(DSEP)和肌电图(EMG)。SSEP 作为术中脊髓连续性监测的主要方法被推广使用,此法监护的主要是脊髓的感觉传导束。是目前脊柱外科手术中脊髓、神经根功能监测的最主要手段。Accadble 等[29]术中运用间断诱发、硬膜外单电极监护的方法监护了 191 例应用椎弓根螺钉行脊柱侧凸矫形术的胸腰椎脊柱侧凸患者,SSEP 对于术中脊髓损伤有 100%的敏感性和 52.69%的特异性。

电或机械刺激引发的 EMG 较多应用于椎弓根螺钉手术的术中监护。Raynor 等[30]评价了 EMG 监护的 92 例各种脊柱脊髓疾病患者 677 个胸椎椎弓根螺钉(T6~T12)固定手术,认为置入单个椎弓根螺钉时 EMG 的阈值小于 6 mA 且和同一例患者置入的其他椎弓根钉阈值相比下降了 60%~65%,提示椎弓根内侧壁受到损害,认为此标准可作为术中应用 EMG 监护椎弓根螺钉置入时手术安全性的评价标准。Shi 等[31]在术中应用 EMG 监测了 22 例脊柱脊髓疾病患者置入胸椎椎弓根螺钉的手术,记录到中 87 个椎弓根螺钉置入时的肌电图变化,并在术后进行 CT 扫描对比研究,在刺激阈值大于 11 mA 时 97.5%的椎弓根螺钉未穿破骨皮质,认为术中肌电图监测可在判断置入胸椎椎弓根螺钉是否穿破椎弓根内侧皮质时提供快速而有用的信息。Gunnarsson 等[32]在术中用神经电生理监护的方法监护了 213 例胸腰段脊柱手术的患者,其中 69 例行脊柱融合手术,发现对于判断术后是否出现新的神经功能缺陷,连续的 EMG 有 100%的敏感性和 23.7%的特异性,SSEP 有 28.6%的敏感性和 94.7%的特异性,认为结合 SSEP 和连续诱发的 EMG 进行术中神经损伤的监护是安全有效的方法。

7. 3D 打印导航模版置钉

3D 打印,又称快速成型技术,是一种以数字模型文件为基础,通过专用软件处理和 3D 打印机逐层累加材料,最终制造出实体模型的技术。该技术以其快速、个性化及逐层制造的特点,在近年来发展迅

速, 目前已被用于许多医学领域。它在脊柱外科领域的应用于 1999 年首次被描述为打印整个脊柱的 3D 模型, 以帮助可视化复杂的畸形病例。3D 打印在脊柱手术中的一个外科应用是创建个性化的椎弓根螺钉导向器和模板, 可以明显提高置钉精确性最大化降低钉道打入椎管损伤脊髓的概率, 间接提高手术安全性。Guarimo [33]等与 Hu [34]等的研究均显示, 借助 3D 打印导板进行置钉能够达到预期的精确效果。Merc [35]等的对比研究进一步明确, 3D 打印导航组的置钉精确率显著高于传统手术组, 凸显了该技术在复杂脊柱手术中的临床价值。在手术规划中, 3D 模型能够直观展示复杂的骨骼解剖结构、辅助规划螺钉轨迹与截骨范围, 并帮助医生精确评估所需的矫正程度。然而, 该技术目前主要局限于骨骼系统, 无法准确模拟神经、肌肉及血管等软组织的位置[36], 这一局限使其在涉及重要软组织规避的手术中存在潜在风险。

8. 手术机器人置钉

随着技术进步, 骨科手术机器人已在脊柱外科领域得到广泛应用, 显著提升了手术安全性与植钉准确度。自 2004 年首个脊柱手术机器人系统 Mazor 获美国 FDA 批准以来, 多种基于 CT 导航的机器人系统相继问世并投入临床试验。目前, 具有代表性的系统包括 Mazor 系列、ROSA、Excelsius GPS、SPINEBOT 以及国产的“天玑”机器人等。Fan [37]等人基于多项随机对照试验和队列研究进行的荟萃分析则发现, 机器人辅助技术的置钉准确性显著优于徒手技术。多项回顾性研究, 如 Molliqaj [38]等和 Macke 等的研究, 也指出机器人辅助技术能实现高达 93.4% 的置钉准确率, 优于传统方法的 88.9%, 尤其在脊柱侧弯等复杂病例中展现出优势。尽管外科机器人技术前景看好, 但它显然仍处于初级阶段, 机器人程序的执行率没有理想的那么高, 需要进一步研究和改进。

参考文献

- [1] Hadra, B.E. (1891) Wiring of the Spinous Process in Injury and Pott's Disease. *Transactions of the American Orthopedic Association*, s1-4, 206-211.
- [2] King, D. (1948) Internal Fixation for Lumbosacral Fusion. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **30**, 560-578. <https://doi.org/10.2106/00004623-194830030-00003>
- [3] Michele, A.A. and Krueger, F.J. (1949) Surgical Approach to the Vertebral Body. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **31**, 873-878. <https://doi.org/10.2106/00004623-194931040-00023>
- [4] Harrington, P.R. (1962) Treatment of Scoliosis. Correction and Internal Fixation by Spinal Instrumentation. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **44**, 591-634. <https://doi.org/10.2106/00004623-196244040-00001>
- [5] Boucher, H.H. (1959) A Method of Spinal Fusion. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, **41**, 248-259. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.41b2.248>
- [6] Luque, E.R. (1982) The Anatomic Basis and Development of Segmental Spinal Instrumentation. *Spine*, **7**, 256-259. <https://doi.org/10.1097/00007632-198205000-00010>
- [7] Steffee, A.D., Biscup, R.S. and Sitkowskj, D.J. (1986) Segmental Spine Plates with Pedicle Screw Fixation a New Internal Fixation Device for Disorders of the Lumbar and Thoracolumbar Spine. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **203**, 45-53. <https://doi.org/10.1097/00003086-198602000-00006>
- [8] Roy-Camille, R., Saillant, G. and Mazel, C. (1986) Plating of Thoracic, Thoracolumbar, and Lumbar Injuries with Pedicle Screw Plates. *Orthopedic Clinics of North America*, **17**, 147-159. [https://doi.org/10.1016/s0030-5898\(20\)30425-9](https://doi.org/10.1016/s0030-5898(20)30425-9).
- [9] Weinstein, J.N., Rydevik, B.L. and Rauschnig, W. (1992) Anatomic and Technical Considerations of Pedicle Screw Fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **284**, 34-46. <https://doi.org/10.1097/00003086-199211000-00006>
- [10] Magerl, F.P. (1984) Stabilization of the Lower Thoracic and Lumbar Spine with External Skeletal Fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **189**, 125-141. <https://doi.org/10.1097/00003086-198411000-00014>
- [11] Krag, M.H., van Hal, M.E. and Beynonn, B.D. (1989) Placement of Transpedicular Vertebral Screws Close to Anterior Vertebral Cortex. *Spine*, **14**, 879-883. <https://doi.org/10.1097/00007632-198908000-00020>
- [12] 单云官, 李俊祯, 杨少华. 椎弓根形态学及其临床意义[J]. 中国临床解剖学杂志, 1988, 6(4): 219-221.
- [13] 杜心如. 腰椎椎弓根螺钉人字嵴顶点进钉方法的大体和放射解剖学研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国协和医

科大学, 1999.

- [14] Lien, S., Liou, N. and Wu, S. (2006) Analysis of Anatomic Morphometry of the Pedicles and the Safe Zone for Through-Pedicle Procedures in the Thoracic and Lumbar Spine. *European Spine Journal*, **16**, 1215-1222. <https://doi.org/10.1007/s00586-006-0245-2>
- [15] Mitra, S.R., Datir, S.P. and Jadhav, S.O. (2002) Morphometric Study of the Lumbar Pedicle in the Indian Population as Related to Pedicular Screw Fixation. *Spine*, **27**, 453-459. <https://doi.org/10.1097/00007632-200203010-00004>
- [16] Krag, M.H., Beynon, B.D., Pope, M.H. and DeCoster, T.A. (1988) Depth of Insertion of Transpedicular Vertebral Screws into Human Vertebrae: Effect Upon Screw-Vertebra Interface Strength. *Journal of Spinal Disorders*, **1**, 287-294. <https://doi.org/10.1097/00002517-198800140-00002>
- [17] Laine, T., Mäkitalo, K., Schlenzka, D., Tallroth, K., Poussa, M. and Alho, A. (1997) Accuracy of Pedicle Screw Insertion: A Prospective CT Study in 30 Low Back Patients. *European Spine Journal*, **6**, 402-405. <https://doi.org/10.1007/bf01834068>
- [18] Gertzbein, S.D. and Robbins, S.E. (1990) Accuracy of Pedicular Screw Placement *in Vivo*. *Spine*, **15**, 11-14. <https://doi.org/10.1097/00007632-199001000-00004>
- [19] Castro, W.H.M., Halm, H., Jerosch, J., Malms, J., Steinbeck, J. and Blasius, S. (1996) Accuracy of Pedicle Screw Placement in Lumbar Vertebrae. *Spine*, **21**, 1320-1324. <https://doi.org/10.1097/00007632-199606010-00008>
- [20] Fu, T.S., Wong, C.B., Tsai, T.T., *et al.* (2008) Pedicle Screw Insertion: Computed Tomography versus Fluoroscopic Image guidance. *International Orthopaedics*, **32**, 517-521.
- [21] Carbone, J.J., Tortolani, P.J. and Quartararo, L.G. (2003) Fluoroscopically Assisted Pedicle Screw Fixation for Thoracic and Thoracolumbar Injuries: Technique and Short-Term Complications. *Spine*, **28**, 91-97. <https://doi.org/10.1097/00007632-200301010-00021>
- [22] Schouten, R., Lee, R., Boyd, M., Paquette, S., Dvorak, M., Kwon, B.K., *et al.* (2012) Intra-Operative Cone-Beam CT (O-Arm) and Stereotactic Navigation in Acute Spinal Trauma Surgery. *Journal of Clinical Neuroscience*, **19**, 1137-1143. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2012.01.020>
- [23] Ishikawa, Y., Kanemura, T., Yoshida, G., Matsumoto, A., Ito, Z., Tauchi, R., *et al.* (2011) Intraoperative, Full-Rotation, Three-Dimensional Image (O-Arm) —Based Navigation System for Cervical Pedicle Screw Insertion. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **15**, 472-478. <https://doi.org/10.3171/2011.6.spine10809>
- [24] Knafo, S., Mireau, E., Bennis, S., Baussart, B., Aldea, S. and Gaillard, S. (2017) Operative and Perioperative Durations in O-Arm vs C-Arm Fluoroscopy for Lumbar Instrumentation. *Operative Neurosurgery*, **14**, 273-278. <https://doi.org/10.1093/ons/oxp142>
- [25] Silbermann, J., Riese, F., Allam, Y., Reichert, T., Koepfert, H. and Gutberlet, M. (2011) Computer Tomography Assessment of Pedicle Screw Placement in Lumbar and Sacral Spine: Comparison between Free-Hand and O-Arm Based Navigation Techniques. *European Spine Journal*, **20**, 875-881. <https://doi.org/10.1007/s00586-010-1683-4>
- [26] 刘亚军, 田伟, 刘波, 等. CT 三维导航系统辅助颈椎椎弓根螺钉内固定技术的临床应用[J]. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7(7): 630-633.
- [27] 王铀, 崔赓, 张永刚, 等. 脊柱畸形手术中 CT 导航与徒手椎弓根置钉准确性比较[J]. 解放军医学院学报, 2015, 36(6): 595-598.
- [28] Laine, T., Lund, T., Ylikoski, M., Lohikoski, J. and Schlenzka, D. (2000) Accuracy of Pedicle Screw Insertion with and without Computer Assistance: A Randomised Controlled Clinical Study in 100 Consecutive Patients. *European Spine Journal*, **9**, 235-240. <https://doi.org/10.1007/s005860000146>
- [29] Accadbled, F., Henry, P., de Gauzy, J.S. and Cahuzac, J.P. (2006) Spinal Cord Monitoring in Scoliosis Surgery Using an Epidural Electrode. Results of a Prospective, Consecutive Series of 191 Cases. *Spine*, **31**, 2614-2623. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000240642.28495.99>
- [30] Raynor, B.L., Lenke, L.G., Kim, Y., Hanson, D.S., Wilson-Holden, T.J., Bridwell, K.H., *et al.* (2002) Can Triggered Electromyograph Thresholds Predict Safe Thoracic Pedicle Screw Placement? *Spine*, **27**, 2030-2035. <https://doi.org/10.1097/00007632-200209150-00012>
- [31] Shi, Y., Binette, M., Martin, W.H., Pearson, J.M. and Hart, R.A. (2003) Electrical Stimulation for Intraoperative Evaluation of Thoracic Pedicle Screw Placement. *Spine*, **28**, 595-601. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000049926.43292.93>
- [32] Gunnarsson, T., Krassioukov, A.V., Sarjeant, R. and Fehlings, M.G. (2004) Real-Time Continuous Intraoperative Electromyographic and Somatosensory Evoked Potential Recordings in Spinal Surgery: Correlation of Clinical and Electrophysiologic Findings in a Prospective, Consecutive Series of 213 Cases. *Spine*, **29**, 677-684. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000115144.30607.e9>
- [33] Guarino, J., Tennyson, S., McCain, G., Bond, L., Shea, K. and King, H. (2007) Rapid Prototyping Technology for Surgeries of the Pediatric Spine and Pelvis: Benefits Analysis. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, **27**, 955-960.

<https://doi.org/10.1097/bpo.0b013e3181594ced>

- [34] Hu, Y., Yuan, Z., Spiker, W.R., Albert, T.J., Dong, W., Xie, H., *et al.* (2013) Deviation Analysis of C2 Translaminar Screw Placement Assisted by a Novel Rapid Prototyping Drill Template: A Cadaveric Study. *European Spine Journal*, **22**, 2770-2776. <https://doi.org/10.1007/s00586-013-2993-0>
- [35] Merc, M., Drstvensek, I., Vogrin, M., Brajlilh, T. and Recnik, G. (2013) A Multi-Level Rapid Prototyping Drill Guide Template Reduces the Perforation Risk of Pedicle Screw Placement in the Lumbar and Sacral Spine. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **133**, 893-899. <https://doi.org/10.1007/s00402-013-1755-0>
- [36] Sugawara, T., Kaneyama, S., Higashiyama, N., Tamura, S., Endo, T., Takabatake, M., *et al.* (2018) Prospective Multi-center Study of a Multistep Screw Insertion Technique Using Patient-Specific Screw Guide Templates for the Cervical and Thoracic Spine. *Spine*, **43**, 1685-1694. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000002810>
- [37] Fan, Y., Du, J.P., Liu, J.J., Zhang, J.N., Qiao, H.H., Liu, S.C., *et al.* (2018) Accuracy of Pedicle Screw Placement Comparing Robot-Assisted Technology and the Free-Hand with Fluoroscopy-Guided Method in Spine Surgery: An Updated Meta-Analysis. *Medicine*, **97**, e10970. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000010970>
- [38] Molliqaj, G., Schatlo, B., Alaid, A., Solomiichuk, V., Rohde, V., Schaller, K., *et al.* (2017) Accuracy of Robot-Guided versus Freehand Fluoroscopy-Assisted Pedicle Screw Insertion in Thoracolumbar Spinal Surgery. *Neurosurgical Focus*, **42**, E14. <https://doi.org/10.3171/2017.3.focus179>