

天玑机器人在低龄儿童胸椎骨折治疗中的应用价值：病例报道

刘雪*, 王若义#

山东大学齐鲁第二医院儿外科, 山东 济南

收稿日期: 2025年10月18日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月20日

摘要

机器人辅助技术在成人脊柱手术中应用广泛, 但低龄儿童脊柱特殊的生理及解剖特性, 使机器人技术应用的安全性及可行性, 仍需进一步证实。本文通过报道一例5岁胸椎爆裂骨折患儿接受天玑机器人辅助下胸椎骨折切开复位内固定术的病例, 初步展示了该技术在低龄患者高位胸椎骨折手术中应用的可行性, 并获得了满意的早期临床效果, 提示该技术在提升此类高风险手术安全性方面具有应用潜力。

关键词

儿童胸椎骨折, 机器人辅助手术, 天玑, 椎弓根螺钉

The Application Value of Tianji Robot in the Treatment of Thoracic Vertebral Fractures in Young Children: A Case Report

Xue Liu*, Ruoyi Wang#

Pediatric Surgery, The Second Qilu Hospital of Shandong University, Jinan Shandong

Received: October 18, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 20, 2025

Abstract

Robot-assisted technology is widely used in adult spinal surgery. However, the unique physiological and anatomical characteristics of the spine in young children mean that the safety and feasibility of

*第一作者。

#通讯作者。

robot technology application still need further verification. This article reports a case of a 5-year-old child with a thoracic burst fracture who underwent open reduction and internal fixation of the thoracic fracture assisted by the Tianji Robot. It initially demonstrates the feasibility of this technology in the surgery of upper thoracic fractures in young patients, and achieves satisfactory early clinical results, suggesting that this technology has application potential in improving the safety of such high-risk surgeries.

Keywords

Pediatric Thoracic Vertebral Fracture, Robot-Assisted Surgery, Tianji Robot, Pedicle Screw

Copyright © 2025 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

胸椎骨折在儿童中相对较少, 约占儿童脊柱创伤的 9%, 多由高能量损伤(如坠落、车祸等)引起, 易合并脊髓损伤[1]。儿童骨骼正处于快速发育阶段、椎弓根细小、骨量及骨密度低等解剖及生物力学特殊性, 导致其与成人相比, 传统透视引导下的螺钉置入难度增大, 更容易发生螺钉偏置、脊髓及血管损伤[2]。近年来, 骨科手术机器人, 特别是国产“天玑”机器人, 已被广泛应用于成人胸腰椎骨折的椎弓根螺钉固定术, 研究表明其具有高精度、低辐射、低创伤等优势[3][4]。但是, 儿童相关病例报道较少, 特别是低龄儿童, 且长期随访数据缺乏。本文报道 1 例 5 岁儿童胸椎骨折, 采用“天玑”骨科机器人辅助下行胸椎骨折切开复位内固定术及椎管减压术, 结合文献分析, 探讨机器人辅助技术在低龄儿童脊柱外科中的优势。

2. 资料与方法

伦理声明: 本研究经山东大学齐鲁第二医院伦理委员会审核通过(KYLL202509622), 并经患儿法定监护人知情同意。

2.1. 临床资料

患者, 女, 5 岁, 因车祸致 T3、T4 胸椎骨折伴 T4 椎弓崩解及创伤性湿肺入院。查体见: 胸椎椎体生理曲度存在, T4 棘突压痛、叩击痛, 胸前区 T2-T10 平面感觉过敏, 左侧髂腰肌肌力 4 级, 其余肌力及肌张力正常, 双下肢浅感觉减退, 左侧为重, 左下肢麻木。术前 MRI 检查如图 1 示: T3、T4 胸椎骨折伴 T4 椎弓崩解; T3 椎体向后滑脱并椎管狭窄, 相应胸髓受压变形。既往无特殊病史。

经保守治疗稳定病情后, 完善术前检查, 排除手术禁忌后, 于入院后第 6 天, 在全麻下行机器人辅助下行胸椎骨折切开复位内固定术及椎管减压术, 术中神经生理监测, 详细手术过程如下: 麻醉成功后, 留置尿管, 患儿取俯卧位, 分别于头部及肢体连接针电极, 常规消毒铺巾, 取 T2-T6 纵行切口长约 20 cm, 依次切开皮肤、皮下, 肌层, 推开椎旁肌肉显露棘突及椎板、椎弓根, 在机器人辅助下于 T2、T3、T5、T6 两侧椎弓根分别置导引克氏针, 依次置入 8 枚椎弓根钉。超声骨刀切断 T3、T4 椎弓板, 将椎管开窗, 面积约 3*2.5 cm, 见开窗部位有硬膜外血肿, 清除部分血肿, 预弯联合棒至 15°左右, 于两侧椎弓根钉安装联合棒, 螺钉加压、固定, 透视见内固定位置满意, 于椎旁使用自体骨及人工骨植骨, 留置硬膜外引流管 1 根, 清点器械敷料无误后依次缝合切口各层。手术顺利, 术中进行肌电图监测, 手术过程中无异

常, 术中出血约 100 ml, 行自体血回输 260 ml, 麻醉清醒后四肢可活动, 术后患儿安返病房。术后虽出现感染发热, 但经抗感染等对症治疗后得到有效控制, 恢复良好, 术后第 10 天复查 X 线如图 2 显示内固定位置佳。术后第 11 天病情稳定出院, 嘱患者卧床休息, 定期复查。1 月、半年后复查 DX 如图 2, 显示内固定位置可、无松脱及移位。

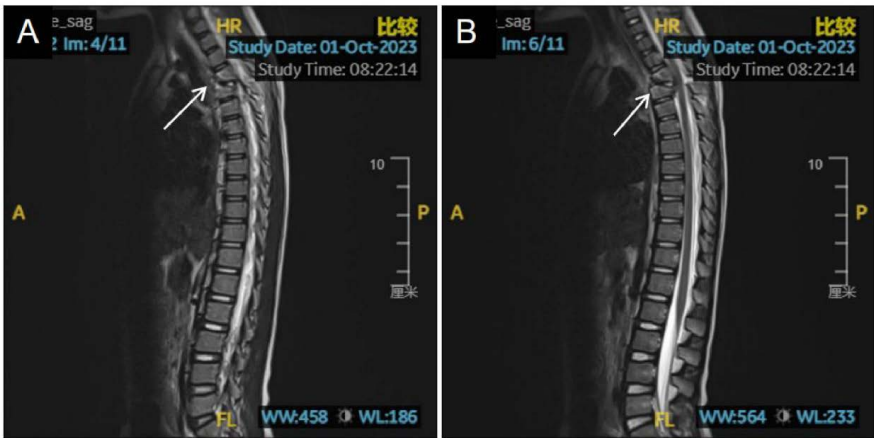


Figure 1. Preoperative MRI
图 1. 术前 MRI

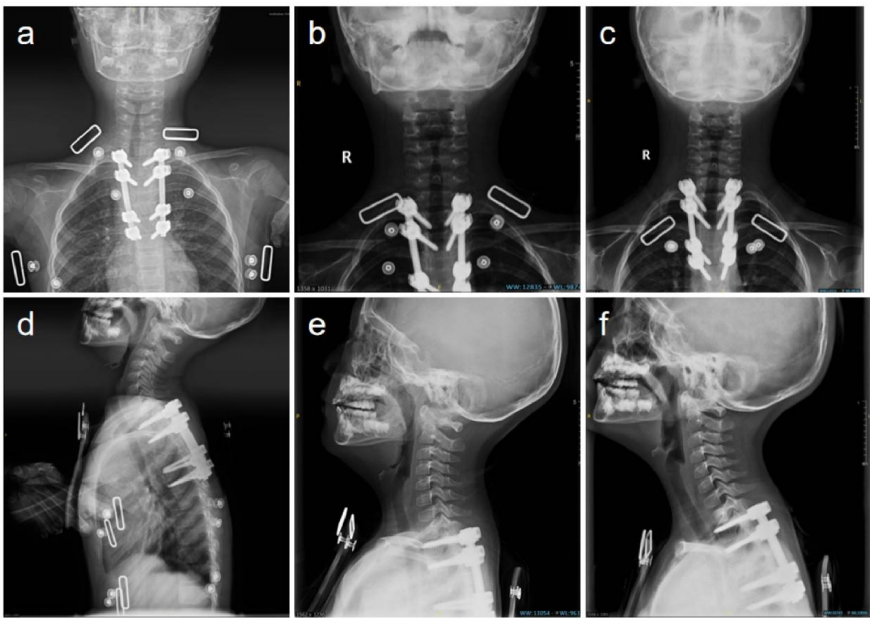


图 a、d 为术后第 10 天 DX 片；b、e 为术后 1 个月 DX 片；c、f 为术后半年复查 DX。
由 a-c, d-f 可以看到术后半年内内固定装置稳定, 无移位。

Figure 2. The DX of postoperative follow-up
图 2. 术后复查 DX

2.2. 长期随访计划

为系统评估手术对患儿脊柱发育及功能的长期影响, 我们计划在术后 1 年、2 年及骨骼发育成熟后进行定期复查。每次随访将包括站立位全脊柱正侧位 X 线片, 评估脊柱曲度、椎体高度及内固定位置;

同时采用儿童脊柱功能量表(Pediatric Outcomes Data Collection Instrument, PODCI)评估其日常生活活动能力、运动功能及生活质量。通过长期影像与功能评估, 全面监测其脊柱生长发育情况及手术远期效果。

3. 讨论

儿童脊柱具有独特的解剖学特征及生长发育需要, 主要体现在结构尚不完善、椎弓根直径小、骨密度低、椎旁组织松弛, 同时脊髓对机械压迫的耐受性低, 这使得儿童胸椎置钉面临多重挑战。目前胸椎骨折最常采用的手术方式是后路椎弓根螺钉内固定, 但是传统徒手置钉依赖术者经验, 风险较高, 同时术中透视反复确认不仅增加了射线暴露风险, 还难以保证置钉精准[1] [2]。Castillo 等在系统性回顾中指出, 相对于成人, 儿童置钉的失败率随年龄降低而增高, 且更易发生神经根损伤。因此, 如何提高儿童置钉精准度, 同时最大程度降低手术风险, 是儿童脊柱创伤手术需要解决的关键问题。

目前, 脊柱手术机器人已被广泛应用于脊柱创伤与退变性疾病的椎弓根螺钉固定[3], 相较于成人, 儿童对精准度的高需求及电离辐射的敏感性是儿童脊柱手术必须考虑的问题。而“天玑”第三代机器人通过多模态影像融合、实时导航追踪和机械臂稳定操作, 可控制椎弓根螺钉置入误差在 0.5 mm 内, 尤其适用于儿童脊柱手术, 同时, 术前一次透视即可完成全部规划[5], 能够减少辐射暴露量, 缩短手术时间。现已有大量研究证实, 机器人辅助手术较传统徒手置钉相比不仅能够显著提高螺钉置入精度, 还能减少术中透视次数及辐射剂量[3] [6] [7]。例如, Hu 等[8]报道, 机器人组椎弓根螺钉置入准确率为 94.23%, 高于徒手组的 79.86%, 且术中出血量显著低于徒手组。就临床预后方面而言, 机器人辅助手术能够加快患者康复进程[4] [9]。Liang 等[10]在成人胸腰椎骨折对照研究中发现, 机器人辅助组 VAS 疼痛评分在术后 1 天和 3 天更低; Liu 等[7]的研究也表明机器人手术组的终板塌陷及后凸畸形复发率低于传统手术组, 然而其短期功能恢复却与徒手技术相当; 另外, Soni 等[11]观察到机器人手术在椎体高度恢复、降低骨水泥渗漏率方面具有显著优势, 能够促进术后恢复。综上所述, 现有证据表明机器人技术在儿童脊柱手术中具有多方面的显著优势, 尤其在提升手术精度和预后方面表现突出。

本文报道的病例中, 综合考虑患儿 T3、T4 移位需要精准复位、稳定固定, 选择机器人辅助下切开复位胸椎骨折内固定术。术前通过透视, 天玑机器人系统自动识别椎弓根轴线并模拟最佳螺钉路径, 术中采用光学追踪技术实时导航确保螺钉进入理想位置, 使入钉轨迹偏差控制在 1 mm 以内[12], 在避免损伤脊髓、神经根及邻近血管的同时, 又减少了术中的辐射暴露[13]。值得关注的是, 儿童脊柱生长发育的特殊性, 使得机器人辅助手术展现出其独特优势: 其能够在保证稳定固定的同时使用最少数量的螺钉, 达到“有限内固定”的目的, 从而最大程度地保护儿童脊柱的生理功能[2]。这与 Castillo 等[1]观点一致, 即儿童胸腰椎骨折应尽量减少固定节段数以保护脊柱生长, 同时避免大范围软组织剥离以降低术后瘢痕及邻近节段退变风险, 而机器人辅助手术的高精度特点恰好能够很好地实现这一点。本文病例采用传统切开的方式, 但由于该术式需进行大范围肌肉剥离, 易引起椎旁肌肉萎缩及去神经化[14], 所以在术中施行神经电生理监测[15]以保护周围神经, 仅在 T2、T3、T5、T6 置入螺钉, 尽最大限度来保护脊柱功能。最近, Wiltse 入路椎弓根螺钉固定术[6]应用增多, 其术中不必推开椎旁肌肉, 但其对术者技术要求高, 且操作复杂, 可能导致手术时间过长, 本例并未采用。术后患儿神经功能正常, 且术后 10 天即出院, 相较于文献中报道的平均住院时间 9~18 天[1], 恢复更快, 进一步证明机器人技术在儿童脊柱手术中具有高度安全性与可行性。

尽管如此, 机器人辅助儿童脊柱手术技术若要成为常规临床应用, 仍有其局限性。本研究为单中心个案报道, 样本量小, 随访时间有限, 尚不能代表所有低龄儿童胸椎骨折患者的普遍情况[1] [2]。机器人辅助技术本身也存在设备成本高、术前规划耗时较长等缺点。此外, 本病例选择开放手术而非微创 Wiltse 入路, 主要考虑到术中需同时进行椎管减压及血肿清除, 开放术野更利于操作安全。尽管采用了“有限

内固定”策略, 仅固定 T2、T3、T5、T6, 但内固定物的存在仍可能对患儿远期脊柱生长发育产生影响, 如潜在的长节段僵硬、邻近节段代偿性活动度增加等问题, 需通过长期随访进一步观察。例如, Staartjes 等[16]在研究中就提出, 虽然机器人置钉精度高, 但仍需长期随访观察螺钉在生长中的稳定性及对脊柱发育的潜在影响。此外, 机器人辅助仍需要手术团队具备充分的解剖学知识与开放手术技能, 以保障置钉的精准度(套筒与骨面接触时, 可能因术者操作产生偏移)及降低二次规划率, 并能及时应对术中的突发紧急情况[17]。

综上, 机器人技术在低龄儿童胸椎骨折治疗中具有可行性, 能够提高置钉精准度, 降低术中风险及射线暴露, 并促进术后快速康复。本文报道的 5 岁儿童胸椎骨折治疗的成功实践仅为个例, 随访至术后半年螺钉未出现脱落, 且未对生长发育造成影响, 提示该技术在儿童脊柱创伤领域具有较高的安全性及应用前景, 但日后仍需通过更大样本进一步验证。

参考文献

- [1] Castillo, J., Soufi, K., Zhou, J., Kulubya, E., Javidan, Y. and Ebinu, J.O. (2024) Minimally Invasive Techniques in the Surgical Management of Traumatic Pediatric Thoracolumbar Fractures. *World Neurosurgery*, **182**, e292-e300. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.11.102>
- [2] Villeneuve, L.M., Lee, B., Cornwell, B., Nagarajan, M. and Smith, Z.A. (2022) Robot-assisted Thoracolumbar Fixation after Acute Spinal Trauma: A Case Series. *Cureus*, **14**, e31832. <https://doi.org/10.7759/cureus.31832>
- [3] 龚光耀. 天玑骨科机器人辅助椎弓根螺钉内固定术的临床应用[J]. 基层医学论坛, 2024, 28(32): 33-36.
- [4] 孟磊, 张贯林, 李东风, 等. “天玑”骨科手术机器人辅助下经皮椎弓根钉内固定治疗胸腰椎骨折的疗效观察[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2022, 37(7): 705-708.
- [5] Lin, S., Hu, J., Wan, L., et al. (2020) Short-Term Effectiveness Comparison between Robotic-Guided Percutaneous Minimally Invasive Pedicle Screw Internal Fixation and Traditional Open Internal Fixation in Treatment of Thoracolumbar Fractures. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, **34**, 76-82.
- [6] 徐子戡, 刘俊鹏, 黎萌. 骨科手术机器人辅助 Wiltse 入路椎弓根螺钉固定术对脊柱骨折合并脊髓损伤的近远期疗效分析[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(4): 552-557.
- [7] Liu, P., Hu, J., Zhang, W., Lin, S., Yu, Y., Tang, L., et al. (2025) Robot-Assisted Percutaneous Pedicle Screw Fixation in Thoracolumbar Burst Fractures: A Comparative Study. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 23175. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05081-2>
- [8] Hu, X., Lu, H., Zhou, X., Hu, M., Pan, X., Chen, B., et al. (2023) A Comparative Study of Robot-Assisted and Traditional Surgeries in the Treatment of Thoracolumbar Fractures Based on 1-Year Follow-Up Observation. *Bio-Medical Materials and Engineering*, **34**, 375-383. <https://doi.org/10.3233/bme-222521>
- [9] Ye, Z., Bai, J., Ye, Z., Zhao, X., Song, F., Zhou, Z., et al. (2024) Surgical Outcomes of Robotic-Assisted Percutaneous Fixation for Thoracolumbar Fractures in Patients with Ankylosing Spondylitis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **25**, Article No. 484. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07597-6>
- [10] Liang, L., Zhao, C., Luo, L., Liu, L., Li, P., Gao, Y., et al. (2025) A Comparative Study of Robot-Assisted Navigation versus C-Arm Fluoroscopy in Percutaneous Pedicle Screw Fixation for the Treatment of Thoracolumbar Fractures. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 27214. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12549-8>
- [11] Soni, A., Vidyadhara, S., Balamurugan, T. and Kanhangad, M.P. (2025) Robotic-Assisted Kyphoplasty Demonstrates Superior Efficacy, Safety, and Procedural Efficiency Compared to Fluoroscopy-Guided Techniques: A Retrospective Analysis of 240 Patients. *Journal of Robotic Surgery*, **19**, Article No. 343. <https://doi.org/10.1007/s11701-025-02520-0>
- [12] 张知理, 吴楠, 朱坤, 等. 天玑机器人与传统透视辅助经皮椎弓根钉内固定术治疗单节段胸腰椎骨折的对比研究[J]. 淮海医药, 2023, 41(6): 588-592.
- [13] Lai, J., Tan, H., Deng, P., Wang, Y., Huang, Y., Feng, H., et al. (2025) Tirobot-Assisted Percutaneous Vertebroplasty in the Management of Middle and Upper Thoracic Osteoporotic Vertebral Compression Fracture. *BMC Surgery*, **25**, Article No. 395. <https://doi.org/10.1186/s12893-025-03049-7>
- [14] Tian, Y., Zhang, J., Chen, H., et al. (2020) A Comparative Study of Spinal Robot-Assisted and Traditional Fluoroscopy-Assisted Percutaneous Reduction and Internal Fixation for Single-Level Thoracolumbar Fractures without Neurological Symptoms. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, **34**, 69-75.
- [15] 荣荣, 王诗军, 王宇, 等. 术中神经生理监测在脊柱畸形矫形手术中的应用进展[J]. 中华骨与关节外科杂志,

2018, 11(6): 460-465, 469.

- [16] Staartjes, V.E., Molliqaj, G., van Kampen, P.M., Eversdijk, H.A.J., Amelot, A., Bettag, C., *et al.* (2019) The European Robotic Spinal Instrumentation (EUROSPIN) Study: Protocol for a Multi-Centre Prospective Observational Study of Pedicle Screw Revision Surgery after Robot-Guided, Navigated and Freehand Thoracolumbar Spinal Fusion. *BMJ Open*, **9**, e030389. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-030389>
- [17] Choucha, A., Travaglini, F., De Simone, M., Evin, M., Farah, K. and Fuentes, S. (2025) The Da Vinci Robot, a Promising Yet Underused Minimally Invasive Tool for Spine Surgery: A Scoping Review of Its Current Role and Limits. *Neurochirurgie*, **71**, Article ID: 101624. <https://doi.org/10.1016/j.neuchi.2024.101624>