

机器人技术在微创治疗骨盆骨折中的未来发展

白若辰*, 胡新佳#

深圳市人民医院(暨南大学第二临床医学院)创伤骨科, 广东 深圳

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月21日; 发布日期: 2025年3月31日

摘要

背景: 机器人辅助骨盆骨折复位系统可以潜在地降低感染风险并改善预后, 从而带来显著的健康和经济效益。然而, 由于尚未解决的困难, 这些系统仍处于实验室阶段, 尚未准备好商业化。虽然以前的综述侧重于单个技术, 系统组成和手术分期, 但有必要进行全面的综述, 以帮助未来的学者选择适合临床应用的研究方向。方法: 使用PubMed检索机器人辅助骨盆骨折复位系统的相关文献。全面搜索“骨盆骨折复位”、“计算机辅助骨盆骨折手术”和“机器人辅助骨盆骨折复位”的结果分别为2222、196和32。选取了约200篇文章, 通过对摘要的审阅, 选取了10篇高度相关的文章进行全文阅读。结果和结论: 螺钉固定在骨盆骨折治疗中的应用, 使手术更加微创化, 越来越多的辅助技术应用于微创螺钉置入。术前3D打印技术与骨科手术机器人辅助螺钉置入相结合是一种可行的创新辅助技术。通过术前3D打印规划, 可以减少骨科手术机器人辅助手术中螺钉绘制时间, 降低螺钉绘制难度。这也使得手术中进入点的选择更有针对性。在不增加术中侵入性操作时间和透视次数的前提下, 将术前3D打印技术与机器人完美结合, 可以提高螺钉置入精度, 实现良好的骨折固定, 减少手术并发症。

关键词

骨盆骨折复位, 虚拟手术, 机器人辅助骨盆骨折复位, 术前规划, 术中登记, 导航, 骨盆骨折复位机器人

Future Development of Robotics in Minimally Invasive Treatment of Pelvic Fractures

Ruochen Bai*, Xinjia Hu#

Department of Orthopedic Trauma, Shenzhen People's Hospital (The Second Clinical Medical College of Jinan University), Shenzhen Guangdong

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 21st, 2025; published: Mar. 31st, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 白若辰, 胡新佳. 机器人技术在微创治疗骨盆骨折中的未来发展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(4): 8-16.
DOI: 10.12677/acm.2025.154896

Abstract

Background: Robot-assisted pelvic fracture reduction systems can potentially reduce the risk of infection and improve outcomes, leading to significant health and economic benefits. However, due to unresolved difficulties, these systems are still in the laboratory stage and not yet ready for commercialization. While previous reviews have focused on individual techniques, system composition, and surgical staging, a comprehensive review is necessary to help future scholars select research directions that are appropriate for clinical application. **Methods:** PubMed was used to search the relevant literature of robot-assisted pelvic fracture reduction system. A comprehensive search for “pelvic fracture reduction”, “computer-assisted pelvic fracture surgery” and “robot-assisted pelvic fracture reduction” yielded 2222, 196 and 32 results, respectively. About 200 articles were selected, and through a review of the abstract, 10 highly relevant articles were selected for in-depth reading. **Results and Conclusions:** The application of screw fixation in the treatment of pelvic fractures makes the surgery more minimally invasive, and more and more assistive techniques are applied to minimally invasive screw placement. Preoperative 3D printing technology combined with robot-assisted screw placement in orthopedic surgery is a feasible and innovative assistive technology. Preoperative 3D printing planning can reduce the time and difficulty of screw drawing in orthopedic robot-assisted surgery. This also makes the selection of entry points during surgery more targeted. Under the premise of not increasing the invasive operation time and fluoroscopy times during the operation, the perfect combination of preoperative 3D printing technology and robot can improve the screw placement accuracy, achieve good fracture fixation, and reduce surgical complications.

Keywords

Reduction of Pelvic Fracture, Virtual Surgery, Robot Assisted Reduction of Pelvic Fractures, Preoperative Planning, Intraoperative Registration, Navigation, Pelvic Fracture Reduction Robot

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

骨盆骨折通常由高能量创伤引起, 导致骨盆前后环结构受损。为了恢复并维持骨盆环的稳定性, 并重建与正常骨盆相似的生物力学特性, 临床实践中通常需要对前后骨盆环同时进行固定[1]。骨盆前后环损伤的固定方法主要包括外固定架固定、切开复位钢板内固定、微创经皮骶髂螺钉固定以及耻骨支螺钉固定[2][3]。虽然传统的切开复位内固定可达到最佳解剖复位, 并提供牢固的固定。但其缺点是手术创伤严重, 出血多, 易损伤附近的关键血管和神经, 影响术后恢复。微创手术是现代医学发展的趋势。以机器人辅助的精密骨科治疗技术已成为外科技术发展的主要方向之一[4]-[6]。骨盆环损伤的手术概念也在不断更新。手术入路已逐渐从传统的切开复位内固定转变为微创螺钉内固定[7][8]。

骶髂关节及前柱联合螺钉微创固定技术是治疗骨盆前后环骨折的一种有效替代手术方案。X 线引导下经皮骶髂螺钉固定或耻骨支螺钉固定是稳定骨盆环的良好手术方法。该方法侵入性小, 并发症少, 尤其适用于骨盆前环耻骨支螺钉固定。生物力学研究表明, 骶髂螺钉固定骨盆后环具有可靠的机械强度, 可以提供一致的骨盆稳定性[9][10]。然而, 仅在透视引导下, 人工很难保证每个螺钉都位于最佳位置。插入的准确性可能会有所不同, 而且透视过程也会增加辐射暴露, 可能导致患者和医务人员的组织损伤。机器人辅助或计算机辅助的三维透视导航无疑是精确放置螺钉的最佳选择[6][11][12]。

计算机和机器人技术的发展导致了各种机器人辅助骨折复位(RAFR)系统来缓解这些问题。使用 RAFR 系统的典型手术通常包括以下几个阶段: 骨折复位的术前计划、术中登记和导航以及机器人骨折复位[13]。RAFR 系统最早的概念可以追溯到 1995 年[14]。此后, 德国的组织[15] [16], 新西兰[17], 英国[18]-[21]和其他国家[22]进行了相关研究。

在对以往研究的全面回顾中, 有必要了解技术演变过程, 以确定技术解决方案和未来的发展趋势, 以促进 RAFR 系统在临床和商业领域的应用。几位研究人员回顾了 RAFR 系统中涉及的技术。这些研究为 RAFR 系统领域的研究者和实践者提供了宝贵的资源。Zhao 等人[23]和 Bai 等人[24]对导航和机器人系统进行了全面概述, 而 Bai 等人则专注于骨折复位手术机器人的结构和相关辅助技术。Moolenaar 等人[25]和 Jiménez 等人[26]描述了计算机辅助骨折复位预规划中使用的主要程序和标准技术, 以及它们的优缺点。然而, 上述综述主要集中在个别关键技术、系统组成和手术分期上。本文旨在探讨机器人技术在微创治疗骨盆骨折中的未来发展。

中国拥有“天际”机器人系统的完全知识产权, 该系统是中国科技部“数字化诊疗重点研发”项目自主开发的, 用于骨科手术过程。第三代骨科手术机器人 TiRobot 代表了最新一代多功能的最先进的骨科手术机器人导航系统。该机器人系统采用模块化、小型化和一般化的设计, 可以帮助医生在最小的 X 射线照射下精确规划螺钉插入的位置、轨迹和长度。指导医师安全高效地完成固定手术。与传统手术相比, 该机器人系统操作简单, 定位精确, 微创, 手术时间短, 辐射损伤小[27]。Liu 等人[28]通过引入该系统, 已经实施了机器人辅助微创内固定治疗各种类型的盆腔环损伤。并表示大多数手术技术正在从使用微创入路的性能角度进行评估。中国自主研发制造的高端创新机器人应用于骨科手术, 为骨盆骨折的微创治疗提供了新的途径。此研究凸显了中国在骨盆骨折医学诊断和治疗方面的领先能力的提高。严格选择适合的适应症患者, 规范手术流程, 保证手术质量, 以及适当的手术原理和手术效果, 必将使精确的机器人方法得到普及和广泛采用, 使广大骨科患者受益。

本研究的目的是探讨机器人辅助手术在骨盆骨折微创治疗中的现状、挑战和未来发展方向。

2. 方法

为了进行全面的文献调查, PubMed 检索了有关“骨盆骨折复位”、“计算机辅助骨盆骨折手术”和“机器人辅助骨盆骨折复位”的信息。搜索结果分别为 2222、196 和 32。选择与微创治疗骨盆骨折相关的研究, 排除具有以下特征的研究: (1) 未使用机器人。(2) 重点不是减少骨折(例如, 使用机器人辅助固定, 机器人辅助全髋关节或全膝关节置换术)。我们选择了大约 200 篇具有一般相关性的文章。在阅读摘要后, 选取相关度较高的 10 篇文章进行深度阅读。

3. 机器人辅助手术

机器人辅助手术在骨科领域的应用正在迅速发展, 尤其是在关节置换、脊柱手术、骨折及软组织修复等方面。机器人辅助手术通过提供更高的精确性、可重复性和更小的手术创伤, 逐渐成为骨科手术的重要工具。与传统手术相比, 机器人辅助手术具有许多优势, 如更高的操作精度、更小的手术切口、更快的恢复速度和减少并发症的风险。2024 年, Jing 等人[29]探讨了术前 3D 打印规划技术联合骨科手术机器人辅助螺钉置入术在骨盆骨折微创治疗中的优势及效果, 以及与单纯骨科手术机器人辅助螺钉置入术相比较。其研究表明, 在骨盆骨折螺钉固定治疗中, 术前 3D 打印技术规划结合骨科手术机器人, 与单纯骨科手术机器人辅助螺钉置入相比, 可显著减少术中螺钉牵引时间, 降低牵引难度, 提高螺钉置入精度, 且不增加侵入性手术时间和透视次数。这种方法使手术更加安全, 是一种值得应用的方法。

1) MAKO 系统(Mako Surgical Corp)是目前骨科领域最为知名的机器人辅助手术系统之一, 主要用于髋关节和膝关节的全关节置换手术。其工作原理为, MAKO 系统利用计算机断层扫描(CT)或磁共振成像(MRI)获取患者骨骼的三维图像, 结合机器人技术精确规划手术路径。系统提供高度个性化的手术方案, 并辅助手术过程中定位和操作。MAKO 系统的优势包括精准性和个性化方案, 它使得关节置换的手术更符合患者的具体解剖特点。临床研究表明, MAKO 系统能显著降低术后感染、出血和恢复时间, 患者术后疼痛较轻, 恢复速度较快。2020 年, Xu 等人[30]在他们的研究中阐述了 2018 年 11 月至 2020 年 1 月期间所有接受机器人辅助前入路全髋关节置换术(MAKO Surgical Corp, 佛罗里达州劳德代尔堡)的患者, 25 例患者接受机械臂辅助的前入路(DAA)全髋关节置换术(THA)。肢体长度差由术后 10.0 mm (± 6.4 mm)恢复至 0.1 mm (± 3.4 mm)。术前股骨偏位差为 5.1 mm (± 5.1 mm), 术后矫正为 1.9 mm (± 6.5 mm)。靶倾角 40° 9 例, 平均达到 40.7° ($\pm 0.9^\circ$)。靶倾角 45° 16 例, 平均达到 45.3° ($\pm 1.0^\circ$)。平均前倾为 19.5° ($\pm 2.4^\circ$)。指出将 DAA 的肌肉保留技术与机械臂辅助平台相结合, 是改善 THA 预后的一个有希望的解决方案。

2) 机器人辅助手术系统(RAS)是一种更加广泛的术中机器人辅助手术方式, 通常由“达芬奇机器人系统”代表。虽然达芬奇机器人系统最早应用于泌尿外科、胃肠外科等领域, 但它也越来越多地应用于骨科手术中, 特别是在脊柱手术领域。RAS 系统通过机器人控制台和多个机械臂, 配合高清视图和精准的仪器, 可以进行极为细致的操作。外科医生操作机器人时, 可以获得三维视图和更高的放大率, 减少手术中的误差。在脊柱手术中, RAS 系统的应用可以帮助外科医生准确放置螺钉, 减少传统手术中的出血和损伤, 尤其在复杂的脊柱畸形矫正手术中, 精确性至关重要。RAS 系统也可以用于关节镜检查, 特别是在关节软骨修复和韧带重建手术中, 提供更加精准的操作与组织修复, 减少对周围组织的损伤。2024 年, Zaidi 等人[31]提出了一种新型机械臂辅助全膝关节置换术系统(ROSA), 这是一项回顾性队列研究, 由三名受过关节成形术培训的外科医生对 77 例患者进行了 3 个月的随访, 该研究指出 ROSA 膝关节系统具有可接受的冠状面和矢状面切除的准确性和精度, 在整个平台工作流程的各个步骤中几乎没有异常值。

3) ROBODOC 系统是早期被广泛用于骨科手术的机器人系统之一, 主要应用于关节置换手术, 尤其是髋关节和膝关节置换。ROBODOC 系统先结合 CT 扫描成像技术, 生成患者骨骼的三维图像, 机器人再根据这些图像进行切割和假体安装。2023 年 Wu 等人[32]在他们的研究中阐述了机器人系统在全关节置换术(TJA)修正中的使用, 包括主动(ROBODOC)和半主动(MAKO 和 NAVIO)系统。该文献指出机器人辅助技术虽然可以帮助外科医生重复执行术前计划, 并在翻修 TJA 期间准确实现手术目标。但是, 术前金属伪影、配准技术、封闭的软件平台、植入物移除后进一步的骨质流失, 以及机器人辅助手术是否会改善植入物的定位和长期存活, 这些问题仍然值得关注。

4) NAVIO 系统是另一款主要应用于膝关节置换和修复手术的机器人辅助手术系统。它结合了计算机导航技术和机器人精确引导, 帮助外科医生在进行关节置换时更加精确地规划和执行手术。NAVIO 系统通过传感器和计算机导航实时追踪手术过程, 提供关节的精确定位和切割路径。在膝关节置换手术中, 系统可以精确地测量膝关节的角度, 帮助医生精确调整假体的放置位置。在一项 NAVIO 和 ROSA 在机器人全膝关节置换术中的准确性和早期结果的比较[33]研究中, 回顾性研究包括了 88 例患者(88 个膝关节), 均采用 NAVIO 或 ROSA 机器人系统进行全膝关节置换术。在 2021 年 1 月至 2022 年 1 月期间, 40 名患者接受了 NAVIO 治疗, 而在 2021 年 2 月至 2021 年 12 月期间, 48 名患者在另一家机构接受了 ROSA 治疗, 结果表明两种机器人系统在放射学上没有差异; 然而, NAVIO 组的股骨矢状面切割误差小于 ROSA 组, ROSA 组的手术时间短于 ROSA 组, ROSA 组的膝关节 1 年 KSS 2011 症状评分高于 NAVIO 组。证实了采用 NAVIO 和 ROSA 进行全膝关节置换手术(TKA)后影像学结果相似的假设; 然而, 另一个早期临床结果相似的假设被证明是错误的。

5) 总结: 机器人辅助手术在骨科领域的应用正不断扩展, 特别是在关节置换、脊柱手术、软组织修复等方面。MAKO、RAS、ROBODOC 和 NAVIO 等机器人系统在提供高度精确、个性化治疗的同时, 帮助外科医生提高了手术的安全性和效率。这些技术的进步不仅提高了患者的治疗效果, 也推动了骨科手术向更精细、更微创的方向发展。随着技术的不断发展, 未来机器人辅助手术将变得更加普及, 并可能成为骨科手术的标准治疗方法。

4. 机器人技术在骨盆骨折微创治疗中的当前应用

2024 年, Liao 等人[34]探讨了复位机器人联合导航机器人辅助微创治疗 Tile B 型骨盆骨折的临床疗效, 通过回顾性分析 2022 年 1 月~2023 年 2 月 10 例 Tile B 型骨盆骨折患者临床资料。其中交通事故伤 5 例, 重物压伤 3 例, 高处坠落伤 2 例。受伤至手术时间 4~13d, 平均 6.8 d。骨折 Tile 分型: B1 型 2 例, B2 型 1 例, B3 型 7 例。10 例患者骨盆复位时间 42~62 min, 平均 52.3 min; 复位质量根据 Matta 评分标准, 获优 4 例、良 5 例、中 1 例, 复位优良率为 90%。手术时间 180~235 min, 平均 215.5 min; 术中透视 18~66 次, 平均 31.8 次; 术中透视时间 16~59 s, 平均 28.6 s; 术中出血量 50~200 mL, 平均 110.0 mL; 术中均无重要血管、神经损伤发生。术后患者均获随访, 随访时间 13~18 个月, 平均 1 个月。X 线片复查示骨折均愈合, 愈合时间 11~14 周, 平均 12.3 周; 随访期间 1 例髋关节周围异位骨化形成。末次随访时, 髋关节功能 Majeed 评分达 70~92 分, 平均 72.7 分; 获优 2 例、良 8 例, 优良率 100%。该结论表明了复位机器人联合导航机器人辅助微创治疗 Tile B 型骨盆骨折具有智能化、安全性高、操作便捷、微创的特点, 可获得可靠疗效。

5. 机器人辅助手术微创治疗的技术挑战

机器人辅助骨折复位技术已经进行了广泛的研究[35]。然而, 在这项技术应用于临床手术之前, 必须解决几个问题和限制。骨科手术机器人正朝着图像增强、结构精简、智能人机交互、微创手术、远程手术等方向发展。它们具有模块化、智能化、轻量化设计和高集成度等特点。

1) 模块化: 模块化是目前先进设备发展的一个重点, 也是骨科手术机器人发展趋势的一个显著特征。它涉及设计不同的功能模块, 这些功能模块独立执行骨折复位过程, 然后通过接口进行集成。

2) 智能化: 先进的传感技术提高了临床手术中的准确性, 有助于外科医生的决策。骨科手术机器人使用现代传感器和计算机技术来提高对环境变化的敏感性, 从而实现更精确的临床决策。

3) 轻量化设计: 骨科手术机器人的传统研究优先考虑手术功能, 往往忽视机器人尺寸和质量对手术环境的影响。研究人员越来越关注于开发轻量级的骨科手术机器人, 以提供高精度的手术, 占用最小的空间, 并提供可变的运动能力。

4) 集成化: 随着高端设备加工技术的进步, 骨科手术机器人系统越来越多地采用更小的部件。集成技术简化了系统设计, 扩展了手术机器人的功能。

尽管骨科手术机器人的有效性得到了证明, 但在实际的临床过程中, 某些技术障碍和问题往往被忽视。结构轻量化: 这包括简化结构, 减小尺寸和重量, 最大限度地降低设计和制造成本, 减轻患者的经济负担, 同时保持高精度和安全性。高智能: 这些机器人配备了先进的传感和计算技术, 可以准确地检测环境变化, 支持医疗决策, 或自主做出手术决策。系统模块化: 这允许各种模块技术的有效更新, 降低设备成本和制造时间, 并增强系统适应性。功能集成: 包括使用微组件使手术机器人更轻, 简化系统设计和扩大应用范围。这四个问题代表了现有文献中尚未充分解决或强调的研究挑战。

6. 未来发展方向

1) 结合 AI 和机器学习的机器人手术: 人工智能(AI)通过提高诊断准确性、手术计划和个性化治疗,

正在迅速改变医疗保健,特别是在骨科领域。人工神经网络(ann)、卷积神经网络(cnn)、支持向量机(svm)和集成学习等关键方法显著提高了诊断精度和患者护理。例如,基于cnn的模型在骨折检测和骨关节炎分级等任务中表现出色,具有很高的灵敏度和特异性。在外科手术中,人工智能通过机器人辅助和优化的术前计划来增强手术过程,帮助修复体的尺寸并最大限度地减少并发症。此外,术后护理期间的预测分析使量身定制的康复计划能够缩短恢复时间。尽管取得了这些进步,但数据标准化和算法透明度等挑战阻碍了广泛采用。解决这些问题对于最大限度地发挥人工智能在骨科实践中的潜力至关重要[36]。

2) 微创与机器人技术的结合趋势:未来微创技术将更加依赖机器人辅助手术进行精细操作。在一项关于机器人辅助螺钉固定联合内镜下植骨微创治疗腰椎峡部裂的单中心回顾性研究[37]中,接受机器人辅助的内窥镜骨移植和固定的患者获得的临床结果与接受开放式骨移植和固定的患者相当。两组患者术后腰痛和功能障碍均有显著改善,此外,由于机器人辅助内镜入路的微创性,接受机器人辅助手术的患者通常较少出现术中出血和术后引流,这可以通过减少切口大小、出血和引流量来证明,接受机器人辅助手术的患者术后住院时间更短。住院时间的减少可以减轻家庭的经济和时间负担,提高患者的接受度。

3) 机器人与3D打印技术的结合:3D打印技术经过近年来的研究和发展,在医疗领域得到了广泛的应用,特别是在骨科领域,它可以辅助完成个性化的外科手术[29]。通过将个性化CT数据导入相关软件,不仅可以对骨碎片进行任意分割和模拟复位,还可以设计相应的内固定位置和参数,供外科医生参考。近年来,一些学者也使用了术前3D打印来规划螺钉,提高了螺钉置入的安全性,降低了手术难度。然而,如何在手术中准确地固定导板仍然是一个需要解决的问题。无论是通过增加手术切口,还是通过插入与骨相连的刚性固定材料,如外固定钉,都或多或少地增加了手术创伤,也可能增加术中出血量。同时,术前3D打印技术的数据来源虽然来自个性化CT数据,但与实际相比仍存在一定的数据偏差。

Link [38]等人在应用三维机器人辅助图像导航系统进行经皮骶髂(SI)螺钉固定的研究中,分析了2018年1月至2022年8月141例患者的数据(平均年龄82岁 $\pm$ 10岁,89%为女性)。骨折多为II型骨质疏松性骨折(FFP: 75%)。中位住院时间为12 $\pm$ 7天,单侧SI螺钉的中位手术时间为26分钟。共应用221枚S1螺钉和17枚S2螺钉。没有螺钉松动或移位的迹象。在5颗放置不理想的螺钉中,1颗因感觉损伤而被取下。所有骨水泥渗漏患者均无症状。

他们认为,使用3D机器人辅助图像引导导航系统的手术技术是一种安全固定骨盆背侧脆性骨折的技术,且术后并发症较少。

Cintean [39]等人在虚拟导航结合机器人辅助三维成像的微创髌臼骨折稳定的研究中详细描述了手术过程,在患者仰卧位后,使用Schanz螺钉将患者侧导航参考物固定在髌前上棘上。然后在导航系统对数据集进行三维扫描和配准。使用3D成像允许7.3 mm螺钉植入,然后通过微创切口植入。在2015年至2023年间,101例患者采用微创导航辅助螺钉内固定治疗髌臼骨折。2例患者活动后髌关节发生继发性螺钉脱位,分别行复位螺钉固定术和髌关节置换术翻修手术。因此,微创导航螺钉植骨术提供了足够的治疗疗效和最小移位的髌臼骨折。但必须注意正确的适应证和手术技巧。

术前3D打印技术与骨科手术机器人辅助螺钉置入相结合是一种可行的创新辅助技术。通过术前3D打印规划,可以减少骨科手术机器人辅助手术中螺钉绘制时间,降低螺钉绘制难度。这也使得手术中进入点的选择更有针对性。在不增加术中侵入性操作时间和透视次数的前提下,将术前3D打印技术与机器人完美结合,可以提高螺钉置入精度,实现良好的骨折固定,减少手术并发症[29]。

4) 手术数据与术后康复的整合:Jing等人[29]通过研究发现骨科手术机器人技术的结合提高了手术安全性,降低了手术难度。然而,通过对比手术前后螺钉位置,发现螺钉距离偏差平均为3.05 mm,螺钉空间角度偏差平均为2.22°,这可能会在一定程度上增加手术风险。虽然这些偏差可能看起来很小,但这

些偏差的临床意义值得仔细解释。未来, 机器人辅助手术不仅仅关注术中精度, 还将涉及术后的数据收集与分析, 进一步优化康复方案, 提供基于数据的决策支持。

7. 机器人技术在骨盆骨折微创治疗中的临床展望与前景

骨盆骨折手术的最新进展越来越多地利用了机器人和计算机辅助技术[40]。这些创新已被证明在治疗骨盆脆性骨折(FFP)方面特别有益, 其中导航微创经皮固定技术减少了老年患者的压力并提高了成功率[41]。尽管取得了这些进步, 但专门用于减少骨盆骨折的智能技术的发展仍然有限。Zhao 等人[40]的研究展示了 15 个案例, 说明了一种新型机器人技术在减少移位 FFP 方面的成功应用, 强调了其广泛实施的巨大潜力, 以及在治疗移位的 FFP 方面的安全性和有效性, 即使在健康和骨质量受损的患者中, 也能实现术后疼痛缓解和早期活动。这种创新技术有可能改变人口老龄化的 FFP 管理, 标志着治疗策略的关键转变。未来有必要进行比较研究, 以进一步探索智能技术的适应度及其相对于传统方法的优势。

8. 结论

1) 总结: 螺钉固定在骨盆骨折治疗中的应用, 使手术更加微创化, 越来越多的辅助技术应用于微创螺钉置入。术前 3D 打印技术与骨科手术机器人辅助螺钉置入相结合是一种可行的创新辅助技术[29]。通过术前 3D 打印规划, 可以减少骨科手术机器人辅助手术术中螺钉绘制时间, 降低螺钉绘制难度。这也使得手术中进入点的选择更有针对性。在不增加术中侵入性操作时间和透视次数的前提下, 将术前 3D 打印技术与机器人完美结合, 可以提高螺钉置入精度, 实现良好的骨折固定, 减少手术并发症。

2) 未来研究的方向: 机器人辅助骨折复位系统有几个优点, 包括提高复位精度, 减少体力劳动和辐射暴露, 增强术前规划和术中可视化, 缩短技能习得的学习曲线。在未来, 这些系统将变得集成化和实用化, 具有自动形成的术前计划以及有效提高术中安全性[42]。

参考文献

- [1] Ward, E.F., Tomasin, J. and Vander Griend, R.A. (1987) Open Reduction and Internal Fixation of Vertical Shear Pelvic Fractures. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, **27**, 291-295. <https://doi.org/10.1097/00005373-198703000-00011>
- [2] Stevenson, A.J., Swartman, B. and Bucknill, A.T. (2016) Perkutane interne Fixation bei Beckenfrakturen. *Der Unfallchirurg*, **119**, 825-834. <https://doi.org/10.1007/s00113-016-0242-9>
- [3] Zhou, K., Luo, C., Chen, N., Hu, C. and Pan, F. (2016) Minimally Invasive Surgery under Fluoro-Navigation for Anterior Pelvic Ring Fractures. *Indian Journal of Orthopaedics*, **50**, 250-255. <https://doi.org/10.4103/0019-5413.181791>
- [4] Leung, K.S., Tang, N., Cheung, L.W.H. and Ng, E. (2010) Image-Guided Navigation in Orthopaedic Trauma. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, **92**, 1332-1337. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.92b10.24594>
- [5] Zheng, G. and Nolte, L.P. (2015) Computer-Assisted Orthopedic Surgery: Current State and Future Perspective. *Frontiers in Surgery*, **2**, Article 66. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2015.00066>
- [6] Karthik, K., Colegate-Stone, T., Dasgupta, P., Tavakkolizadeh, A. and Sinha, J. (2015) Robotic Surgery in Trauma and Orthopaedics. *The Bone & Joint Journal*, **97**, 292-299. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.97b3.35107>
- [7] Zwingmann, J., Konrad, G., Kotter, E., Südkamp, N.P. and Oberst, M. (2009) Computer-Navigated Iliosacral Screw Insertion Reduces Malposition Rate and Radiation Exposure. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **467**, 1833-1838. <https://doi.org/10.1007/s11999-008-0632-6>
- [8] Wong, J.M., Bewsher, S., Yew, J., Bucknill, A. and de Steiger, R. (2015) Fluoroscopically Assisted Computer Navigation Enables Accurate Percutaneous Screw Placement for Pelvic and Acetabular Fracture Fixation. *Injury*, **46**, 1064-1068. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.01.038>
- [9] Giráldez-Sánchez, M.A., Lázaro-González, Á., Martínez-Reina, J., Serrano-Toledano, D., Navarro-Robles, A., Cano-Luis, P., et al. (2015) Percutaneous Iliosacral Fixation in External Rotational Pelvic Fractures. a Biomechanical Analysis. *Injury*, **46**, 327-332. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.10.058>
- [10] Zhang, L., Peng, Y., Du, C. and Tang, P. (2014) Biomechanical Study of Four Kinds of Percutaneous Screw Fixation in

- Two Types of Unilateral Sacroiliac Joint Dislocation: A Finite Element Analysis. *Injury*, **45**, 2055-2059. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.10.052>
- [11] Thakkar, S.C., Thakkar, R.S., Sirisreetreerux, N., Carrino, J.A., Shafiq, B. and Hasenboehler, E.A. (2016) 2D versus 3D Fluoroscopy-Based Navigation in Posterior Pelvic Fixation: Review of the Literature on Current Technology. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **12**, 69-76. <https://doi.org/10.1007/s11548-016-1465-5>
 - [12] Matityahu, A., Kahler, D., Krettek, C., Stöckle, U., Grutzner, P.A., Messmer, P., *et al.* (2014) Three-Dimensional Navigation Is More Accurate than Two-Dimensional Navigation or Conventional Fluoroscopy for Percutaneous Sacroiliac Screw Fixation in the Dysmorphic Sacrum: A Randomized Multicenter Study. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **28**, 707-710. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000092>
 - [13] Wu, Z., Dai, Y. and Zeng, Y. (2024) Intelligent Robot-Assisted Fracture Reduction System for the Treatment of Unstable Pelvic Fractures. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 271. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-04761-5>
 - [14] Bouazza-Marouf, K., Browbank, I. and Hewit, J.R. (1995) Robotic-Assisted Internal Fixation of Femoral Fractures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **209**, 51-58. https://doi.org/10.1243/pime_proc_1995_209_316_02
 - [15] Gosling, T., Westphal, R., Hufner, T., Faulstich, J., Kfuri, M., Wahl, F., *et al.* (2005) Robot-Assisted Fracture Reduction: A Preliminary Study in the Femur Shaft. *Medical and Biological Engineering and Computing*, **43**, 115-120. <https://doi.org/10.1007/bf02345131>
 - [16] Westphal, R., Winkelbach, S., Gösling, T., Hüfner, T., Faulstich, J., Martin, P., *et al.* (2006) A Surgical Telem manipulator for Femur Shaft Fracture Reduction. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **2**, 238-250. <https://doi.org/10.1002/rcs.81>
 - [17] Graham, A.E., Xie, S.Q., Aw, K.C., Mukherjee, S. and Xu, W.L. (2008) Bone-Muscle Interaction of the Fractured Femur. *Journal of Orthopaedic Research*, **26**, 1159-1165. <https://doi.org/10.1002/jor.20611>
 - [18] Dagnino, G., Georgilas, I., Morad, S., Gibbons, P., Tarassoli, P., Atkins, R., *et al.* (2017) Image-Guided Surgical Robotic System for Percutaneous Reduction of Joint Fractures. *Annals of Biomedical Engineering*, **45**, 2648-2662. <https://doi.org/10.1007/s10439-017-1901-x>
 - [19] Dagnino, G., Georgilas, I., Morad, S., Gibbons, P., Tarassoli, P., Atkins, R., *et al.* (2017) Intra-Operative Fiducial-Based CT/Fluoroscope Image Registration Framework for Image-Guided Robot-Assisted Joint Fracture Surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **12**, 1383-1397. <https://doi.org/10.1007/s11548-017-1602-9>
 - [20] Wang, T., Li, C., Hu, L., Tang, P., Zhang, L., Du, H., *et al.* (2014) A Removable Hybrid Robot System for Long Bone Fracture Reduction. *Bio-Medical Materials and Engineering*, **24**, 501-509. <https://doi.org/10.3233/bme-130836>
 - [21] Ge, Y., Zhao, C., Wang, Y. and Wu, X. (2022) Robot-Assisted Autonomous Reduction of a Displaced Pelvic Fracture: A Case Report and Brief Literature Review. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article 1598. <https://doi.org/10.3390/jcm11061598>
 - [22] Joung, S., Kamon, H., Liao, H., Iwaki, J., Nakazawa, T., Mitsuishi, M., *et al.* (2008) A Robot Assisted Hip Fracture Reduction with a Navigation System. In: Metaxas, D., Axel, L., Fichtinger, G. and Székely, G., Eds., *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2008*, Springer, 501-508. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85990-1_60
 - [23] Zhao, J., Li, C., Ren, H., Hao, M., Zhang, L. and Tang, P. (2019) Evolution and Current Applications of Robot-Assisted Fracture Reduction: A Comprehensive Review. *Annals of Biomedical Engineering*, **48**, 203-224. <https://doi.org/10.1007/s10439-019-02332-y>
 - [24] Bai, L., Yang, J., Chen, X., Sun, Y. and Li, X. (2019) Medical Robotics in Bone Fracture Reduction Surgery: A Review. *Sensors*, **19**, Article 3593. <https://doi.org/10.3390/s19163593>
 - [25] Moolenaar, J.Z., Tümer, N. and Checa, S. (2022) Computer-Assisted Preoperative Planning of Bone Fracture Fixation Surgery: A State-of-the-Art Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article 1037048. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1037048>
 - [26] Jiménez-Delgado, J.J., Paulano-Godino, F., PulidoRam-Ramírez, R. and Jiménez-Pérez, J.R. (2016) Computer Assisted Preoperative Planning of Bone Fracture Reduction: Simulation Techniques and New Trends. *Medical Image Analysis*, **30**, 30-45. <https://doi.org/10.1016/j.media.2015.12.005>
 - [27] Liu, H., Duan, S., Liu, S., Jia, F., Zhu, L. and Liu, M. (2018) Robot-Assisted Percutaneous Screw Placement Combined with Pelvic Internal Fixator for Minimally Invasive Treatment of Unstable Pelvic Ring Fractures. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **14**, e1927. <https://doi.org/10.1002/rcs.1927>
 - [28] Liu, H., Duan, S., Xin, F., Zhang, Z., Wang, X. and Liu, S. (2019) Robot-Assisted Minimally-Invasive Internal Fixation of Pelvic Ring Injuries: A Single-Center Experience. *Orthopaedic Surgery*, **11**, 42-51. <https://doi.org/10.1111/os.12423>
 - [29] Jing, Y., Chang, L., Cong, B., Wang, J., Chen, M., Tang, Z., *et al.* (2024) Preoperative 3D Printing Planning Technology

- Combined with Orthopedic Surgical Robot-Assisted Minimally Invasive Screw Fixation for the Treatment of Pelvic Fractures: A Retrospective Study. *PeerJ*, **12**, e18632. <https://doi.org/10.7717/peerj.18632>
- [30] Xu, S., Bernardo, L., Yew, K. and Pang, H. (2020) Robotic-Arm Assisted Direct Anterior Total Hip Arthroplasty; Improving Implant Accuracy. *Surgical Technology Online*, **38**, 347-352. <https://doi.org/10.52198/21.sti.38.os1368>
- [31] Zaidi, F., Goplen, C.M., Fitz-Gerald, C., Bolam, S.M., Hanlon, M., Munro, J.T., *et al.* (2024) High *In-Vivo* Accuracy of a Novel Robotic-Arm-Assisted System for Total Knee Arthroplasty. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **33**, 229-238. <https://doi.org/10.1002/ksa.12272>
- [32] Wu, X., Zhou, Y., Shao, H., Yang, D., Guo, S. and Huang, W. (2023) Robotic-Assisted Revision Total Joint Arthroplasty: A State-of-the-Art Scoping Review. *EFORT Open Reviews*, **8**, 18-25. <https://doi.org/10.1530/eor-22-0105>
- [33] Hasegawa, M., Tone, S., Naito, Y. and Sudo, A. (2024) Comparison of Accuracy and Early Outcomes in Robotic Total Knee Arthroplasty Using NAVIO and Rosa. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 3192. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53789-4>
- [34] Liao, J., Dai, Y., Wu, Z., *et al.* (2024) [Effectiveness of Reduction Robot Combined with Navigation Robot-Assisted Minimally Invasive Treatment for Tile Type B Pelvic Fractures]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, **38**, 954-960.
- [35] Zhou, X., Chen, Y., Miao, G., Guo, Y., Zhang, Q. and Bi, J. (2025) Computer-Aided Robotics for Applications in Fracture Reduction Surgery: Advances, Challenges, and Opportunities. *iScience*, **28**, Article ID: 111509. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.111509>
- [36] Khojastehnezhad, M.A., Youseflee, P., Moradi, A., *et al.* (2025) Artificial Intelligence and the State of the Art of Orthopedic Surgery. *The Archives of Bone and Joint Surgery*, **13**, 17-22.
- [37] Zeng, G., Li, Z., Hou, J., Yu, L., Cui, Y., Zhu, Y., *et al.* (2025) Robot-Assisted Screw Fixation Combined with Endoscopic Bone Graft in the Minimally Invasive Treatment of Lumbar Spondylolysis: A Single-Center Retrospective Study. *Orthopaedic Surger.* <https://doi.org/10.1111/os.14368>
- [38] Link, B., Haveman, R.A., Van de Wall, B.J.M., Baumgärtner, R., Babst, R., Beeres, F.J.P., *et al.* (2024) Percutaneous Sacroiliac Screw Fixation with a 3D Robot-Assisted Image-Guided Navigation System: Technical Solutions. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, **37**, 3-13. <https://doi.org/10.1007/s00064-024-00871-9>
- [39] Cinteau, R., Schütze, K., Gebhard, F. and Pankratz, C. (2024) Minimal-Invasive Stabilisation von Azetabulumfrakturen mit Virtueller Navigation in Kombination mit Robotergestützter 3-D-Bildgebung. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, **37**, 14-22. <https://doi.org/10.1007/s00064-024-00872-8>
- [40] Zhao, C., Xiao, H., Cao, Q., Ge, Y., Li, Y., Wang, Y., *et al.* (2024) Innovative Development of Robot Reduction System in Geriatric Pelvic Fractures: A Single-Center Case Series in Beijing, China. *Journal of Orthopaedic Translation*, **49**, 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2024.08.023>
- [41] Rommens, P.M., Hofmann, A., Kraemer, S., Kisilak, M., Boudissa, M. and Wagner, D. (2021) Operative Treatment of Fragility Fractures of the Pelvis: A Critical Analysis of 140 Patients. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, **48**, 2881-2896. <https://doi.org/10.1007/s00068-021-01799-6>
- [42] Kou, W., Zhou, P., Lin, J., Kuang, S. and Sun, L. (2023) Technologies Evolution in Robot-Assisted Fracture Reduction Systems: A Comprehensive Review. *Frontiers in Robotics and AI*, **10**, Article 1315250. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1315250>