



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240241
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.240241
China Journal of General Surgery, 2025, 34(1):144-149.

· 文献综述 ·

手术机器人的自动化研究进展

陈浩^{1,2}, 陆清声²

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 中国人民解放军海军军医大学附属长海医院 血管外科, 上海 200433)

摘要

手术机器人(SR)的自动化技术通过整合力反馈、视觉反馈、医学影像配准和手术导航等关键技术,不仅有效减轻了医生的劳动负荷,使医生能够更加专注于手术的整体执行过程,同时,它降低了对医生手术经验的依赖,有助于推动手术效果的标准化与同质化。尽管当前大多数SR系统仍主要用于辅助操作,部分机器人已初步展现出条件自动化的能力,展现了自动化手术研究的巨大潜力。然而,自动化手术的发展仍面临诸多挑战,如感知能力的不足、人工智能算法的局限性以及手术导航的技术瓶颈。本文总结了国内外常见SR的关键技术及其自动化研究进展,并对未来发展中的挑战与趋势进行探讨。

关键词

机器人手术; 自动化; 专业, 外科; 人工智能; 综述

中图分类号: R61

Progress in the automation of surgical robots

CHEN Hao^{1,2}, LU Qingsheng²

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Department of Vascular Surgery, Changhai Hospital, Naval Medical University, Shanghai 200433, China)

Abstract

The automation technology of surgical robots (SR) integrates key techniques such as force feedback, visual feedback, medical image alignment, and surgical navigation. This integration not only effectively reduces the workload of surgeons, enabling them to focus more on the overall execution of the surgical procedure, but also decreases reliance on surgical experience, contributing to the standardization and homogenization of surgical outcomes. Although most current SR systems are primarily used for assisting operations, some robots have demonstrated conditional automation capabilities, showcasing significant potential in automated surgery research. However, the development of automated surgery still faces numerous challenges, including limited perception capabilities, constraints of artificial intelligence algorithms, and technical bottlenecks in surgical navigation. This paper summarizes the key technologies of commonly used SR systems globally, analyzes the progress in automation research, and discusses the challenges and trends in future development.

Key words

Robotic Surgical Procedures; Automation; Specialties, Surgical; Artificial Intelligence; Review

CLC number: R61

基金项目: 上海市科技计划基金资助项目(23XD1405000)。

收稿日期: 2024-05-11; 修订日期: 2024-12-23。

作者简介: 陈浩, 上海理工大学健康科学与工程学院/中国人民解放军海军军医大学附属长海医院联合培养硕士研究生, 主要从事血管腔内介入手术机器人关键技术方面的研究。

通信作者: 陆清声, Email: luqs@newvascular.cn

微创手术的普及与机器人技术的快速发展,正推动手术机器人(surgical robot, SR)的功能从简单的术中辅助向更高层次的子任务自动化操作迈进^[1]。在此背景下,“自动化”作为关键概念,正愈发受到研究者和临床专家的关注^[2-3]。国际标准组织将自动化定义为:在无需人工干预的情况下,机器人基于当前状态和感知执行预定任务的能力^[4]。SR自动化旨在通过自主完成操作,减少人为误差和不确定性,提升手术的精准性与稳定性。Yang等^[5]提出6级(0~5级)自动化分级,系统性描述医疗机器人从无自主性到完全自主的演进。高等级自主手术要求机器人具备高级感知、自主导航和临床决策能力,并能在复杂手术环境中实现精确操作^[6]。虽然少数领域已实现3级自动化水平,但整体发展仍面临诸多挑战^[7]。本文将总结与分析SR自动化相关的关键技术与国内外研究进展,并探讨未来面临的挑战与趋势。

1 关键技术

1.1 感知能力

SR的感知能力主要包括力感知和视觉感知两大方面^[8],使术者能够直观感受到器械与组织之间的相互作用力,并获得清晰的术野及关键解剖结构的信息,从而精准地控制手术器械操作,最大程度减少对周围组织的损伤^[9]。力感知技术主要通过直接与间接两种方式实现^[10],直接力感知依赖应变片^[11]、光纤^[12]、微型机电系统^[13]等传感单元,以获取实时、高精度的触觉反馈,但应用范围受限于器械尺寸、生物兼容性和消毒要求;间接力感知则通过视觉数据^[14]和驱动参数^[15]进行建模和分析,利用深度学习技术推断力信息,虽适用于复杂或狭小空间的临床环境,但其精度受限于算法鲁棒性与数据质量。此外,视觉感知技术依赖计算机视觉、光纤^[16]和超声传感器^[17]以及电磁定位^[18]等技术,能在复杂场景中识别、定位器械位置^[19],组织特征与空间关系^[20],但在遮挡和动态变化的环境下面临挑战。这些感知技术为SR在微创介入、远程手术、软组织操作等领域的临床应用奠定了坚实基础,为进一步提高SR自动化水平提供关键技术支持。

1.2 医学影像配准

医学影像配准技术通过将术前与术中影像进

行融合,为SR在执行涉及影像导航的外科操作(如骨科和介入治疗)中提供持续而精确的解剖学参考,相当于为机器人构建一幅可随时更新的“手术地图”^[21],在复杂多变的临床环境中提供位置环境信息。对于不需要实时影像介入的腔镜手术而言,该技术并非必备。早期的医学影像配准方法大多依赖特征匹配与强度优化^[22],虽在静态场景下表现良好,但在应对组织形变、器械干扰及视角变化等动态环境中显得力不从心。相较之下,基于深度学习的动态配准技术具备更高的实时性与鲁棒性^[23],可在多模态影像融合的基础上迅速更新解剖信息,其技术理念与机器人领域的同步定位以及地图构建^[24]相呼应,为实现更高等级的自动化手术奠定了重要技术基础。

1.3 手术导航

手术导航综合力感知、视觉感知、路径规划和医学影像配准等关键技术^[25],为手术器械与机械臂提供高精度的动态引导,优化手术流程并减少对术者经验的依赖。根据应用场景,可分为路径导航和方案导航两类:路径导航侧重非开放手术中的实时路径规划和操作引导,如在血管介入过程中^[26],利用术前计算机体层血管成像(computed tomography angiography, CTA)构建三维模型与术中数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)融合生成导航“地图”,并结合路径规划或机器学习算法实现手术器械的自动化引导^[27],有效解决术者在不完全可视化状态下进行细致操作的难题,但对于组织形变和实时动态“地图”的生成仍存在挑战。方案导航则更适用于开放手术,如在骨科手术^[28]过程中,通过多模态三维建模和实时跟踪,动态调整机械臂轨迹应对术中变化,实现对患者和机械臂的双重限位操作^[29],实现术中精准操控,减小组织创伤,提高手术效果的可重复性,但在数据质量以及复杂解剖的适应性方面需要改进与优化。

2 自动化手术在各类型SR中的研究进展

2.1 腔镜SR

腔镜SR是微创外科领域的重要工具,广泛应用于泌尿外科、妇科、胸外科等多个科室,其核心价值在于通过小切口和大术野,进行高精度手术操作^[30]。这在前列腺根治术^[31]、肾部分切除术、子

宫切除术^[32]等复杂手术中尤为重要，能显著提高手术安全性和手术效果。

当前，主流的腔镜SR（如达·芬奇系统）主要依赖外科医生的实时操控，自动化程度相对较低^[33]，然而，研究人员已在达·芬奇平台上开发第三方程序，实现自动化缝合^[34]等子任务。自2016年报道的智能组织自主机器人^[35]半自动完成猪小肠吻合术以来，研究人员逐渐拓展了自动化操作的适用范围^[36]，包括打结，针、线抓取，穿线缝合等^[37]重复性高、耗时的子任务来减轻术者的身体和精神负担^[38]。国内研究正迅速跟进，如中科院深圳先进技术研究院在术中内窥镜场景重建方面取得进展，其在公开数据集上的验证结果表明具有高精度和准确性，为自动化手术导航提供支持^[39]；微创公司自主研发的“图迈”机器人，经验证，其操作性能接近达·芬奇机器人^[40]。尽管腔镜SR的自动化尚面临挑战，包括多样化手术场景的适应性，硬件与算法成本较高^[41]，处理复杂消息和做出手术决策能力的限制^[42]，但其自动化潜力巨大^[43]。未来的研究应聚焦于提升自动化水平，增强适应性，强化人机协同，并平衡安全性和效率。

2.2 骨科SR

骨科SR已在关节置换、骨折复位、脊柱操作等领域取得显著成果^[44]。该类机器人通过在有限切口下完成骨骼的精确定位、截骨和植入物放置，为患者的功能恢复与手术安全提供重要保障。同时，凭借严谨的力线重建和个体化手术路径规划，术后关节力学平衡与假体寿命也得到有效提升。

在当前临床实践中，骨科SR的自动化水平相对领先。美国Think Surgical公司研发的TSolution One机器人已达到3级自动化水平，外科医生在术前利用三维成像对病灶部位进行建模和规划后，机器人可自动完成准备骨骼工作，术者仅需通过监视器和切割工具对手术全程进行监督^[45]，据报道其骨切割与植入误差 $<2\text{ mm}$ 或 2° ^[46]。在此基础上，研究人员正持续扩展其自动化功能，如自动对齐骨折段^[47]、自动选择最佳植入物尺寸及位置等。国内相关技术也在持续推进，天智航公司自主研发的“天玑”系列机器人具备实时跟踪与自动配准能力，误差 $<0.5\text{ mm}$ ；元化智能公司开发的银铍全骨科机器人能够自动规划与导航辅助，实现对齐磨骨与置杯位置的自动对齐。

骨科SR的自动化不仅显著减轻医生的劳动负荷，也提升了手术的精确度与效率，改善患者预后效果。但其在临床中的进一步应用仍面临多重挑战，包括对骨周围软组织状态的感知不足、对复杂病理情况及解剖变异的适应性有限高成本的软硬件投入以及监管和安全性评估方面的严格要求。未来研究方向将着力提升机器人对环境的感知能力与适应能力，增强自主决策能力，优化术前规划和术中执行流程，改进机械臂并发展远程手术的能力，同时不断拓展其在不同手术适应证中的应用范围。

2.3 介入手术SR

近年来，介入手术SR在血管和神经领域的研究与应用发展迅速，能够在高难度解剖结构中实现微创、精准的器械操控，广泛用于冠状动脉、脑血管以及外周血管介入等多种手术场景。通过提供精确的影像引导和高稳定性的机械辅助，这类机器人不仅大幅降低术者的辐射暴露，也提升了手术成功率与整体操作的稳定性^[48]。

在自动化方面，介入手术SR正由单纯术者控制逐步过渡到半自动化阶段。国际上较为成熟的CorPath GRX系统^[49]在血管介入手术中可实现达97.9%的手术成功率，并使术者的辐射暴露减少达95.2%，已获得美国食品药品监督管理局和欧盟认证。该系统的升级版本^[50]将应用范围拓展至脑血管介入领域，具备部分自主的器械导航和部署能力。然而，整体来看，市面上大多数机器人仍维持在1级和2级自动化水平，即虽然拥有一定程度的自主路径规划或器械操作能力，但仍需要术者在决策及全流程操作中进行干预。与此同时，国产机器人也在快速发展，中科院自动化研究所研发的VasCure^[51]的自动导航预测，在动物实验和体外实验中达成98.26%的成功率，平均精度保持在毫米级；华科精准的SR1-3D^[52]神经外科SR突破对CT扫描及标记物配准的依赖，有效缩短术前准备时间；联影医疗^[53]研发的手术导航系统在25次体外实验中成功率达100%，整体操作效率较人类外科医生提高18.38%。

介入手术SR的子任务自动化的实现，需要在力反馈、多模态数据融合、手术导航和精准控制等技术之间进行深度整合^[54]。通过结合高分辨率医学影像、术前三维重建与术中实时影像，机器人可获得更加完整的血管解剖信息，并借助柔性

器械控制策略在狭窄、动态的血管环境中实施精细操作。然而,当前在力反馈技术的成熟度、术前与术中影像配准的多维度信息融合^[55]以及多器械协同与全流程自动化等方面仍存在一定挑战,需要持续的技术攻关与创新来进一步提高手术的安全性与一致性。

3 展望与小结

随着SR相关关键技术的不断突破与整合,其自动化水平正逐步提升^[56]。多模态感知(如力反馈与视觉反馈)、医学影像配准和手术导航技术的持续进步,显著增强了机器人在复杂手术环境中的自主决策与执行能力。通过整合这些技术,自动化手术有效降低了术者在简单操作层面的工作负荷,使其更专注于手术整体执行过程,减少对个人经验的高度依赖,从而促进手术操作的标准化和效果同质化。

然而,实现更高等级的自主性乃至全自动化,仍面临诸多技术与应用上的挑战^[57]。需进一步完善软组织形变补偿机制、实时三维可视化以及高敏感度力感知技术。同时,随着传感器、算法与材料科学的进步,器械微型化、5G技术的发展以及多模态数据融合的深入发展,将为SR自动化拓展更广阔的应用场景。尽管面临成本、集成度与监管等方面的挑战,SR自动化的前景依然乐观^[58]。随着相关技术的成熟和临床经验的积累,未来手术将更安全、高效和可预测,为患者提供更高质量的医疗服务,推动外科领域迈向高精度、个性化与智能化的全新阶段。

作者贡献声明:陈浩查阅文献、研究设计和实施、数据分析、撰写文章;陆清声指导、审阅文章。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Nagy TD, Haidegger TP. Towards standard approaches for the evaluation of autonomous surgical subtask execution[C]//2021 IEEE 25th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). Budapest, Hungary. IEEE, 2021:067-074. doi: 10.1109/INES52918.2021.9512901.
- [2] Fiorini P, Goldberg KY, Liu YH, et al. Concepts and Trends n Autonomy for Robot-Assisted Surgery[J]. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng, 2022, 110(7): 993-1011. doi: 10.1109/JPROC.2022.3176828.
- [3] Fosch-Villaronga E, Khanna P, Drukarch H, et al. The role of humans in surgery automation[J]. Int J Soc Robotics, 2023, 15(3): 563-580. doi:10.1007/s12369-022-00875-0.
- [4] Attanasio A, Scaglioni B, De Momi E, et al. Autonomy in surgical robotics[J]. Annu Rev Control Robot Auton Syst, 2021, 4:651-679. doi:10.1146/annurev-control-062420-090543.
- [5] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics-regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy[J]. Sci Robot, 2017, 2(4): eaam8638. doi: 10.1126/scirobotics.aam8638.
- [6] Dagnino G, Kundrat D. Robot-assistive minimally invasive surgery: trends and future directions[J]. Int J Intell Robot Appl, 2024, 8(4):812-826. doi:10.1007/s41315-024-00341-2.
- [7] Marcus HJ, Ramirez PT, Khan DZ, et al. The IDEAL framework for surgical robotics: development, comparative evaluation and long-term monitoring[J]. Nat Med, 2024, 30(1): 61-75. doi: 10.1038/s41591-023-02732-7.
- [8] 郭靖,吴迪,成卓奇,等. 机器人辅助手术自主性技术的进展[J]. 机器人外科学杂志:中英文, 2023, 4(4):281-298. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2023.04.001.
- Guo J, Wu D, Cheng ZQ, et al. Progress of autonomous technology on robot-assisted surgery[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2023, 4(4):281-298. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2023.04.001.
- [9] 何昊,叶子健,舒畅. 血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状[J]. 中国普通外科杂志, 2021, 30(12): 1477-1484. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012.
- He H, Ye ZJ, Su C. Essential techniques and current research situation in robotic endovascular systems[J]. China Journal of General Surgery, 2021, 30(12): 1477-1484. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012.
- [10] Wang W, Wang J, Luo Y, et al. A survey on force sensing techniques in robot-assisted minimally invasive surgery[J]. IEEE Trans Haptics, 2023, 16(4): 702-718. doi: 10.1109/TOH.2023.3329172.
- [11] Zhang L, Guo S, Yu H, et al. Performance evaluation of a strain-gauge force sensor for a haptic robot-assisted catheter operating system[J]. Microsyst Technol, 2017, 23(10): 5041-5050. doi: 10.1007/s00542-017-3380-2.
- [12] Jiang Q, Li JH, Masood D. Fiber-optic-based force and shape sensing in surgical robots: a review[J]. Sens Rev, 2023, 43(2):52-71. doi:10.1108/sr-04-2022-0180.
- [13] Sitaramgupta VV S N, Sakorikar T, Pandya HJ. An MEMS-based force sensor: packaging and proprioceptive force recognition through vibro-haptic feedback for catheters[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2022, 71:4001911. doi:10.1109/TIM.2022.3141168.
- [14] Lee DH, Kwak KS, Lim SC. A neural network-based suture-tension estimation method using spatio-temporal features of visual

- information and robot-state information for robot-assisted surgery[J]. *Int J Contr Autom Syst*, 2023, 21(12):4032-4040. doi: 10.1007/s12555-022-0469-x.
- [15] Alkayas AY, Feliu-Talegon D, Mathew AT, et al. Shape and tip force estimation of concentric tube robots based on actuation readings alone[C]//2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Singapore, Singapore. IEEE, 2023:1-8. doi: 10.1109/RoboSoft55895.2023.10121920.
- [16] Baker C, Xochicale M, Lin FY, et al. Intraoperative needle tip tracking with an integrated fibre-optic ultrasound sensor[J]. *Sensors*, 2022, 22(23):9035. doi:10.3390/s22239035.
- [17] Yan W, Ding Q, Chen J, et al. Learning-based needle tip tracking in 2D ultrasound by fusing visual tracking and motion prediction[J]. *Med Image Anal*, 2023, 88: 102847. doi: 10.1016/j.media.2023.102847.
- [18] Sharma S, Telikicherla A, Ding G, et al. Wireless 3D surgical navigation and tracking system with 100 μ m accuracy using magnetic-field gradient-based localization[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(8):2066-2079. doi:10.1109/TMI.2021.3071120.
- [19] 伍尚至, 陆清声. 血管介入手术机器人的腔内器械自动识别与跟踪研究进展[J]. *中国普通外科杂志*, 2023, 32(12):1936-1943. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2023.12.013.
- Wu SZ, Lu QS. Research progress on surgical instrument automatic recognition and tracking for endovascular interventional robotics[J]. *China Journal of General Surgery*, 2023, 32(12):1936-1943. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2023.12.013.
- [20] Zhang H, Wang S. Detection of surgical instruments based on Gaussian kernel[J]. *Signal Image Video Process*, 2023, 17(6):3221-3227. doi:10.1007/s11760-023-02548-5.
- [21] 陆清声. 血管疾病诊治的精准智能微创时代[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(37): 2914-2917. doi: 10.3760/cma. j. cn112137-20220421-00881.
- Lu QS. Diagnosis and treatment of vascular diseases in the era of precise, intelligent and minimally invasive surgery[J]. *National Medical Journal of China*, 2022, 102(37):2914-2917. doi:10.3760/cma.j.cn112137-20220421-00881.
- [22] Velesaca HO, Bastidas G, Rouhani M, et al. Multimodal image registration techniques: a comprehensive survey[J]. *Multimed Tools Appl*, 2024, 83(23):63919-63947. doi:10.1007/s11042-023-17991-2.
- [23] Shamshad F, Khan S, Zamir SW, et al. Transformers in medical imaging: a survey[J]. *Med Image Anal*, 2023, 88: 102802. doi: 10.1016/j.media.2023.102802.
- [24] Wu H, Zhao J, Xu K, et al. Semantic SLAM based on deep learning in endocavity environment[J]. *Symmetry*, 2022, 14(3): 614. doi: 10.3390/sym14030614.
- [25] 杨健, 王媛媛, 艾丹妮, 等. 多模态图像引导手术导航进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(15):17-35. doi:10.3788/AOS230742.
- Yang J, Wang YY, Ai DN, et al. Developments of Multimodal Image-Guided Surgical Navigation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15):17-35. doi:10.3788/AOS230742.
- [26] 赵含霖, 谢晓亮, 奉振球, 等. 血管介入手术机器人系统综述[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35(12): 11-16. doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2020.12.004.
- Zhao HL, Xie XL, Feng ZQ, et al. Review of Robotic System for Vascular Interventional Surgery[J]. *China Medical Devices*, 2020, 35(12):11-16. doi:10.3969/j.issn.1674-1633.2020.12.004.
- [27] Karstensen L, Ritter J, Hatzl J, et al. Learning-based autonomous vascular guidewire navigation without human demonstration in the venous system of a porcine liver[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2022, 17(11):2033-2040. doi:10.1007/s11548-022-02646-8.
- [28] 张新星, 赵英杰, 陈超. 计算机辅助骨科手术机器人技术发展及应用综述[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(4):1-7. doi:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.04.001.
- Zhang XX, Zhao YJ, Chen C. Review on the development and application of computer assisted orthopedic surgery robots[J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(4):1-7. doi:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.04.001.
- [29] Yamamoto Y, Fujishiro T, Hirai H, et al. Comparison of cervical pedicle screw placement accuracy with robotic guidance system versus image guidance system using propensity score matching[J]. *Clin Spine Surg*, 2024, 37(10): E424-E432. doi: 10.1097/BSD.0000000000001616.
- [30] 李政, 易波, 王国慧, 等. 基于CiteSpace的机器人结直肠手术临床应用现状与热点可视化分析[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(4):578-591. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.04.008.
- Li Z, Yi B, Wang GH, et al. Visualization analysis of current status and hotspots of clinical application of robot-assisted colorectal surgery based on CiteSpace[J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(4):578-591. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.04.008.
- [31] 褚光迪, 牛海涛. 手术机器人发展史和展望[J]. *泌尿外科杂志:电子版*, 2023, 15(1): 56-60. doi: 10.20020/j. CNKI. 1674-7410.2023.01.11.
- Chu GD, Niu HT. Development history and prospect of surgical robot[J]. *Journal of Urology for Clinicians: Electronic Version*, 2023, 15(1):56-60. doi:10.20020/j.CNKI.1674-7410.2023.01.11.
- [32] 王馨, 王冬. 机器人辅助技术在妇科领域的研究进展[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2024, 5(1):70-74. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.01.012.
- Wang X, Wang D. Research progress of robot-assisted gynecologic surgery[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2024, 5(1):70-74. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.01.012.
- [33] Lee A, Baker TS, Bederson JB, et al. Levels of autonomy in FDA-cleared surgical robots: a systematic review[J]. *NPJ Digit Med*, 2024, 7(1):103. doi:10.1038/s41746-024-01102-y.
- [34] Tanwani AK, Sermanet P, Yan A, et al. Motion2Vec: semi-supervised representation learning from surgical videos[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris, France. IEEE, 2020: 2174-2181. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197324.

- [35] Shademan A, Decker RS, Opfermann JD, et al. Supervised autonomous robotic soft tissue surgery[J]. *Sci Transl Med*, 2016, 8(337):337ra64. doi:10.1126/scitranslmed.aad9398.
- [36] Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis[J]. *Sci Robot*, 2022, 7(62):eabj2908. doi:10.1126/scirobotics.abj2908.
- [37] Ostrander BT, Massillon D, Meller L, et al. The current state of autonomous suturing: a systematic review[J]. *Surg Endosc*, 2024, 38(5):2383–2397. doi:10.1007/s00464-024-10788-w.
- [38] Nagy TD, Haidegger T. Performance and capability assessment in surgical subtask automation[J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2501. doi:10.3390/s22072501.
- [39] Tang X, Tao H, Qian Y, et al. Real-time deformable SLAM with geometrically adapted template for dynamic monocular laparoscopic scenes[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2024, 19(7):1375–1383. doi:10.1007/s11548-024-03174-3.
- [40] Huang J, Zhu H, Lu P, et al. Comparison of lobectomy performed through Toumai® surgical robot and da Vinci surgical robot in early-stage non-small cell lung cancer: a retrospective study of early perioperative results[J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2023, 12(11): 2219–2228. doi:10.21037/tlcr-23-603.
- [41] Fairag M, Almahdi RH, Siddiqi AA, et al. Robotic revolution in surgery: diverse applications across specialties and future prospects review article[J]. *Cureus*, 2024, 16(1): e52148. doi: 10.7759/cureus.52148.
- [42] Liu YZ, Wu XB, Sang YD, et al. Evolution of surgical robot systems enhanced by artificial intelligence: a review[J]. *Adv Intell Syst*, 2024, 6(5):2300268. doi:10.1002/aisy.202300268.
- [43] Rivero-Moreno Y, Echevarria S, Vidal-Valderrama C, et al. Robotic surgery: a comprehensive review of the literature and current trends[J]. *Cureus*, 2023, 15(7):e42370. doi:10.7759/cureus.42370.
- [44] 王军强, 蒋协远. 智能骨科的临床应用研究现状与思考[J]. 首都医科大学学报, 2024, 45(5): 741–743. doi: 10.3969/j.issn.1006-7795.2024.05.001.
- Wang JQ, Jiang XY. Current status of clinical application of intelligent orthopedics[J]. *Journal of Capital Medical University*, 2024, 45(5):741–743. doi:10.3969/j.issn.1006-7795.2024.05.001.
- [45] Cosendey K, Omoumi P, Stanovici J, et al. Bone cuts and implant placements accuracy in total knee arthroplasty performed with an active robotic system[J]. *Osteoarthr Imag*, 2023, 3: 100144. doi: 10.1016/j.ostima.2023.100144.
- [46] Liow MHL, Chin PL, Pang HN, et al. THINK surgical TSolution-One® (Robodoc) total knee arthroplasty[J]. *SICOT J*, 2017, 3:63. doi:10.1051/sicotj/2017052.
- [47] Saeedi-Hosseiny MS, Alruwaili F, Clancy MP, et al. Automatic alignment of fractured femur: integration of robot and optical tracking system[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2023, 8(5): 2438–2445. doi:10.1109/LRA.2023.3251198.
- [48] Zhao Y, Mei Z, Luo X, et al. Remote vascular interventional surgery robotics: a literature review[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(4):2552–2574. doi:10.21037/qims-21-792.
- [49] Weisz G, Metzger DC, Caputo RP, et al. Safety and feasibility of robotic percutaneous coronary intervention: precise (Percutaneous Robotically-Enhanced Coronary Intervention) Study[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 61(15):1596–1600. doi:10.1016/j.jacc.2012.12.045.
- [50] Britz GW, Tomas J, Lumsden A. Feasibility of robotic-assisted neurovascular interventions: initial experience in flow model and porcine model[J]. *Neurosurgery*, 2020, 86(2):309–314. doi:10.1093/neuros/nyz064.
- [51] Zhang LS, Liu SQ, Xie XL, et al. A novel spatial position prediction navigation system makes surgery more accurate[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2023, 42(12): 3614–3624. doi: 10.1109/TMI.2023.3297188.
- [52] Zhou S, Gao Y, Li R, et al. Neurosurgical robots in China: state of the art and future prospect[J]. *iScience*, 2023, 26(11):107983. doi: 10.1016/j.isci.2023.107983.
- [53] Song J, Yang K, Zhang Z, et al. Iterative PnP and its application in 3D–2D vascular image registration for robot navigation[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama, Japan. IEEE, 2024:17560–17566. doi:10.1109/ICRA57147.2024.10610392.
- [54] Liu Z, Wang S, Cao Y, et al. An autonomous guidewire delivery method with distal position-based impedance control[J]. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 2024, 99: 1–15. doi: 10.1109/TASE.2024.3368764.
- [55] Göbel B, Reiterer A, Möller K. Image-based 3D reconstruction in laparoscopy: a review focusing on the quantitative evaluation by applying the reconstruction error[J]. *J Imaging*, 2024, 10(8): 180. doi:10.3390/jimaging10080180.
- [56] Goldberg K, Guthart G. Augmented dexterity: how robots can enhance human surgical skills[J]. *Sci Robot*, 2024, 9(95):eadr5247. doi:10.1126/scirobotics.adr5247.
- [57] Liu T, Wang J, Wong S, et al. A review on the form and complexity of human – robot interaction in the evolution of autonomous surgery[J]. *Adv Intell Syst*, 2024, 6(11): 2400197. doi: 10.1002/aisy.202400197.
- [58] Rivero-Moreno Y, Rodriguez M, Losada-Muñoz P, et al. Autonomous robotic surgery: has the future arrived? [J]. *Cureus*, 2024, 16(1):e52243. doi:10.7759/cureus.52243.

(本文编辑 熊杨)

本文引用格式:陈浩,陆清声.手术机器人的自动化研究进展[J].中国普通外科杂志, 2025, 34(1):144–149. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.240241

Cite this article as: Chen H, Lu QS. Progress in the automation of surgical robots[J]. *Chin J Gen Surg*, 2025, 34(1): 144–149. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.240241