

人工智能赋能腔镜结直肠手术的功能保护及其安全保障

孙振 肖毅

中国医学科学院北京协和医学院 北京协和医院基本外科结直肠专业组,北京 100730

通信作者:肖毅,Email:xiaoy@pumch.cn

【摘要】 经腹及经肛腔镜手术已经成为当前结直肠手术的主流方式。在结直肠癌患者的生存获益得到显著改善的同时,越来越多的结直肠外科医师也开始关注患者术后生活质量的改善,重视脏器功能保留,尤其是术中对于盆腔自主神经的保护。近年来,人工智能(AI)技术在医学领域的应用逐步深入,结直肠外科医师开始探索将其应用于腔镜结直肠手术中。目前已经在对神经及重要器官的识别和保护方面取得一定的成果,但鉴于当前AI应用多为临床前期的探索阶段,其临床推广应用价值有限。而且AI对于形变位移较大的血管识别较为困难,尚无法实现术中精准实时的血管导航及保护,因此,未来该领域的发展应该着力于解决非刚性配准和实时校准等问题,从而深化AI在腔镜结直肠手术功能保护和安全保障方面的应用。

【关键词】 结直肠肿瘤; 手术,结直肠; 人工智能; 功能保护

基金项目:国家自然科学基金(62172437);中国医学科学院医学与健康科技创新工程项目(2023-I2M-C&T-B-026)

Artificial intelligence empowers functional preservation and safety guarantee in laparoscopic colorectal surgery

Sun Zhen, Xiao Yi

Division of Colorectal Surgery, Department of General Surgery, Peking Union Medical College Hospital, Beijing 100730, China

Corresponding author: Xiao Yi, Email: xiaoy@pumch.cn

【Abstract】 Transabdominal and transanal endoscopic approaches have become mainstream in colorectal surgery. With the substantial improvement in survival outcomes for colorectal cancer patients, a growing number of colorectal surgeons are increasingly focusing on enhancing postoperative quality of life, prioritizing functional preservation, especially the intraoperative preservation of pelvic autonomic nerves. Recently, with the gradual deepening of artificial intelligence (AI) applications in the medical field, colorectal surgeons have begun exploring its implementation in colorectal surgery. Current achievements primarily involve the identification and protection of nerves and organs. However, most AI applications remain at preclinical exploration stages, limiting their clinical application. Furthermore, AI faces challenges in recognizing blood vessels with significant deformation and movement. Thus, the precise real-time navigation and protection of blood vessels during surgery have yet to be achieved. Therefore, future developments in this field should focus on resolving issues such as non-rigid registration, real-time calibration etc., thereby deepening the application of AI in functional preservation and surgical safety assurance during laparoscopic colorectal surgery.

【Key words】 Colorectal neoplasms; Surgery, colorectal; Artificial intelligence; Functional preservation

DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20250318-00106

收稿日期 2025-03-18 本文编辑 朱雯洁

引用本文:孙振,肖毅.人工智能赋能腔镜结直肠手术的功能保护及其安全保障[J].中华胃肠外科杂志,2025,28(6):615-618. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20250318-00106.



Fund programs: National Natural Science Foundation of China (62172437); CAMS Innovation Fund for Medical Sciences (2023-I2M-C&T-B-026)

随着结直肠外科手术理念不断朝向微创化和精准化的方向发展,经腹及经肛腹腔镜入路已经成为当前结直肠手术的主流。腔镜下如何辨认并保持正确的解剖层面,如何避免重要血管或者毗邻器官损伤,是结直肠外科医师致力于降低手术风险和手术质量的关键所在。在结直肠癌患者的生存获益得到显著改善的同时,越来越多的结直肠外科医师也开始关注患者术后生活质量的改善,重视脏器功能保留,尤其是手术中对于盆腔自主神经的保护。

结直肠癌手术的进步不只得益于在外科技术及诊疗理念的优化,也从信息化技术的改变中得到启发。人工智能(artificial intelligence, AI)赋能的手术导航是实现手术精准个体化、提升手术安全性的重要支撑手段,是医工交叉领域的技术前沿,也推动了结直肠腔镜外科精细化的发展^[1-4]。本文回顾了近年来腔镜结直肠手术中, AI 技术在患者功能保留和手术安全保障方面的应用,对其在结直肠手术神经、器官和血管保护的探索应用现状进行综述,谨与同道分享。

一、AI 技术在保护神经功能方面的价值

自 1982 年提出以来,全直肠系膜切除术(total mesorectal excision, TME)以其可显著降低局部复发率和改善远期生存的优势,被广泛用于中低位直肠癌患者的治疗中^[5-6]。然而,直肠癌手术中若损伤盆腔自主神经,将导致泌尿生殖功能障碍,严重影响患者术后生活质量。因此, Hojo 等^[7]和 Mass 等^[8]相继定义, TME 的切除范围应介于直肠系膜和自主神经之间,即所谓神经保留原则。神经引导下的 TME 手术可以最大程度地避免泌尿生殖功能的损伤,但是对于因新辅助放疗导致组织水肿和纤维化以及肥胖的患者,腹腔镜视野中解剖层面识别困难,可能在辨识神经仍存在一定的难度^[9-10]。因此,有学者尝试将 AI 应用于直肠手术中辅助识别神经。

对手术图像进行人工标注并基于此构建深度学习模型,目前已有较多研究关注。Kojima 等^[11]基于腹腔镜图像中的人工标注,开发了深度学习(deep learning, DL)模型以识别腹下丛和上腹下丛,该模型 Dice 值约为 0.5 (Dice 值为医学图像分割中

用于衡量两个样本的相似度的统计工具,数值介于 0~1 之间,其中 1 表示完全相同, 0 表示完全不同)^[12]。随后的小样本临床验证其结果并不理想,模型正确识别神经的比例仅为 50%。可能的原因是,在图像中神经标注质量不佳,从而影响模型的识别能力。Han 等^[13]对单中心腹腔镜 TME 手术的 1 424 张高质量的术中图片进行标注,基于此构建的模型具有较好的识别效能,其平均交互比(即预测样本和实际样本交并比的平均值^[14])为 75%,但是该模型并未接受外部验证。Kitaguchi 等^[15]提出基于 DL 的计算机视觉(computer vision, CV)所建立的神经识别模型(NerveNet),其对腹下神经丛和主动脉神经丛分割的 Dice 值为 0.6 左右,且在后续的前瞻性临床验证中,该模型对于神经的识别率可以达到 89% 以上,识别速度甚至比术者更快。该研究证明了 AI 对于腹腔镜直肠手术的神经保护作用,但是鉴于仅前瞻性入组 20 例手术进行分析比较,统计效能有限,还需要更大规模的样本量来验证。

目前,手术中采用 AI 技术指导识别神经的临床价值尚存在争议。Ryu 等^[16]将实时视觉 AI 识别软件 Eureka[®]用于腹腔镜直肠癌手术中,提出该系统可以辅助低年资医师对神经的识别。其对于躯干的腹下丛和腰内脏神经可以做到接近 100% 的识别,但在骨盆水平并未能识别盆神经丛。随后,该团队开展了前瞻性观察研究进行验证,结果表明, Eureka[®]可以提高腹腔镜下无法识别的神经的再识别率(腹下丛神经:45%;腰内脏神经:89%),但对于盆神经丛的再识别率仅有 20.7%^[17]。作者认为该系统仍需要进一步优化才可能应用于临床,但是可以用于低年资医师的腹腔镜操作培训。日本另一项研究同样肯定了 AI 在医师培训方面的价值,虽然其所构建的 AI 模型对于神经识别的 Dice 值仅有 0.442,但是经过 AI 标注视频的学习后,术者可显著提高术中神经识别率,教学效果明显优于传统授课模式^[18]。

综上所述,当前在结直肠手术中应用 AI 技术进行神经保护还处于初级阶段,还不能全程显露从神经根部至末梢的全程分布,在帮助或者提醒外科医生进行精细解剖、神经保护等方面的价值仍很有

限。而且,鉴于大多数回顾性研究的性质,并不能了解 AI 保护后的神经功能,即患者术后功能量表的情况。对于低位直肠癌患者,尤其是肿瘤导致解剖层次不清的患者,如能实现全程保护盆神经丛,将能达到泌尿生殖功能的最大化保留。但是值得肯定的是, AI 在低年资医生手术技能培训方面具有较好的潜力和价值,可以将其作为医学培养或当前住院医师规范化培训的辅助工具。

二、保障手术安全方面的价值

手术根治性和安全性是肿瘤外科手术的根本,术中副损伤及意外出血是外科医生之痛。外科医生受限于腹腔镜局部放大视野的限制,可能会对视野外的器官造成损伤。而且腹腔镜下无法通过触感精确判断血管的位置及走行,术者只能依靠经验和手术技巧进行解剖,如若解剖不当则会损伤血管导致出血,甚至中转开腹手术。因此,如果能了解毗邻器官和重要血管的走行,则可以在保证手术根治性的同时,避免术中严重并发症的出现。

Kitaguchi 等^[15]提出一项输尿管识别模型(UreterNet),该模型不同视角的输尿管识别率为 92%,具有很好的识别效能;随后该团队又进一步证明该模型对于输尿管高效的识别率和显示效率,这对于避免术中输尿管的损伤具有重要的指导价值,期待其在经过进一步临床验证后进行推广^[19]。

经肛全直肠系膜切除术(trans anal total mesorectal excision, taTME)的 AI 导航与器官保护的研究也在进展中。在中低位直肠癌患者中, taTME 因为其独特的“自下而上”的视角可解决腹腔镜入路所面临的“困难骨盆”问题,而受到结直肠外科医生的关注。然而,因其逆向的解剖入路,外科医师需要更加熟练和准确地掌握盆腔解剖结构知识,在跨越学习曲线之前易进入错误的间隙,引起盆腔内周围脏器(如前列腺、阴道甚至尿道)的损伤^[20]。因此,有必要建立 taTME 手术的导航系统,以实现关键器官的保护来保障手术安全,并帮助术者渡过学习曲线。笔者团队成功建立了基于 DL 的前列腺识别模型(IG-Net),通过加入器械引导模块和图像质量关键帧选择模块来提高分割模型的精度和速度,模型的 Dice 值为 0.82,分割速度为 35 帧/s^[21]。我们还在尝试将其融合于真实的腹腔镜手术视野,来实时指示前列腺以及其他重要解剖结构,以避免术中损伤。

对右半结肠癌患者施行完整结肠系膜切除

(complete mesocolic excision, CME)手术,需要解剖并剔除肠系膜上静脉外科干及动脉前方的淋巴脂肪组织。然而,肠系膜上血管解剖结构复杂,且在十二指肠胰头附近变异较多,因此发生血管损伤的概率较高^[22]。有研究发现,可通过 DL 模型对腹腔镜图像的血管区域进行分割,从而实现肠系膜上静脉(superior mesenteric vein, SMV)和回结肠动静脉(ileocolic artery, ICA; ileocolic vein, ICV)的可视化^[23]。但是这与上文提到的神经识别相似,也是基于单中心手术录像的回顾性研究,模型对于 SMV 的分割 Dice 值可达 0.75,但是对 ICA 和 ICV 的分割效果较差, Dice 值仅为 0.54~0.57,而且作者并未报道视频分割的速度能否满足实时手术的要求,因此,其临床实用价值有待加强验证。

对于直肠癌根治术的淋巴结清扫,基于现有的证据,笔者认为,在进行 253 组淋巴结清扫时,尽量不清扫至肠系膜下动脉(inferior mesenteric artery, IMA)起始部 1 cm 以内,以保留泌尿生殖功能^[24]。因此,如果能清晰地显示 IMA 的走行和起始部,则可以达到这一目的。Kitaguchi 等^[25]通过其所建立的多中心手术视频数据库(LapSig300)中最常见的 IMA 的标注和训练,建立了 DL 模型,其分割 IMA 的平均 Dice 值为 0.798。或许是因为 IMA 的位置较为固定,因此模型分割效能优于前文提到对于 ICA 的分割。

总体而言,如果能实现血管的实时分割,再结合增强现实技术将术前血管 CT 图像进行配准,或可实现对实时术中导航,以引导术者进行预期的淋巴结清扫。但是,由于相比神经和输尿管等较为固定的结构,血管在手术中会随着系膜出现显著的位移及形变,导致当前无法实现血管的非刚性实时配准,制约了手术导航系统的建立。

三、总结与展望

当前,关于腹腔镜结直肠手术中的 AI 应用研究层出不穷,值得肯定的是,其识别对神经、输尿管以及前列腺等具有一定的保护作用,尤其是对于低年资术者。

但是,我们要意识到, AI 与手术的结合目前仍处于初级阶段,无论在研究的时效性,还是在样本量方面, AI 在腹腔镜结直肠手术的保护作用都缺乏足够级别的循证证据,医工交叉的团队应遵循 IDEAL 框架,开展进一步的临床研究来证明其临床价值。此外, AI 对于形变和位移较大的血管等软

组织识别能力有限,以至于无法实现精准实时的导航来避免损伤。未来仍需要解决非刚性配准和术中实时校准等问题,才能真正实现 AI 在腔镜结直肠手术进行有效的功能保护和安全保障。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 花苏榕,王智弘,李佳颐,等.深度学习技术识别喉返神经在经胸乳入路腔镜甲状腺手术中的探索[J].中华内分泌外科杂志,2022,16(3):287-292. DOI: 10.3760/cma.j.cn.115807-20220328-00078.
- [2] 花苏榕,王智弘,高俊义,等.深度学习技术识别喉返神经在经腋窝腔镜甲状腺手术中的探索[J].中华内分泌外科杂志,2022,16(1):5-11. DOI: 10.3760/cma.j.cn.115807-20211213-00384.
- [3] Wang Z, Tao H, Wang J, et al. Laparoscopic right hemihepatectomy plus total caudate lobectomy for perihilar cholangiocarcinoma via anterior approach with augmented reality navigation: a feasibility study[J]. Surg Endosc, 2023, 37(10):8156-8164. DOI: 10.1007/s00464-023-10397-z.
- [4] Zhu T, Jiang S, Yang Z, et al. A neuroendoscopic navigation system based on dual-mode augmented reality for minimally invasive surgical treatment of hypertensive intracerebral hemorrhage[J]. Comput Biol Med, 2022, 140:105091. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2021.105091.
- [5] Heald RJ, Husband EM, Ryall RD. The mesorectum in rectal cancer surgery--the clue to pelvic recurrence? [J]. Br J Surg, 1982, 69(10): 613-616. DOI: 10.1002/bjs. 1800691019.
- [6] Heald RJ, Ryall RD. Recurrence and survival after total mesorectal excision for rectal cancer[J]. Lancet, 1986, 1(8496): 1479-1482. DOI: 10.1016/s0140-6736(86)91510-2.
- [7] Hojo K, Vernava AM, Sugihara K, et al. Preservation of urine voiding and sexual function after rectal cancer surgery[J]. Dis Colon Rectum, 1991, 34(7):532-539. DOI: 10.1007/BF02049890.
- [8] Maas CP, Moriya Y, Steup WH, et al. Radical and nerve-preserving surgery for rectal cancer in The Netherlands: a prospective study on morbidity and functional outcome[J]. Br J Surg, 1998, 85(1):92-97. DOI: 10.1046/j.1365-2168.1998.00530.x.
- [9] Zhou H, Ruan C, Sun Y, et al. Nerve-guided laparoscopic total mesorectal excision for distal rectal cancer[J]. Ann Surg Oncol, 2015, 22(2): 550-551. DOI: 10.1245/s10434-014-4161-0.
- [10] 张建锋,于滨,张振亚,等.中低位直肠癌新辅助治疗后全系膜切除术的难点与对策[J].中华消化外科杂志,2023, 22(6):724-728. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20230425-00185.
- [11] Kojima S, Kitaguchi D, Igaki T, et al. Deep-learning-based semantic segmentation of autonomic nerves from laparoscopic images of colorectal surgery: an experimental pilot study[J]. Int J Surg, 2023, 109(4):813-820. DOI: 10.1097/JS9.0000000000000317.
- [12] Dice LR. Measures of the amount of ecologic association between species [J]. Ecology, 1945, 26:297-302. DOI: 10.2307/1932409.
- [13] Han F, Zhong G, Zhi S, et al. Artificial intelligence recognition system of pelvic autonomic nerve during total mesorectal excision[J]. Dis Colon Rectum, 2025, 68(3): 308-315. DOI: 10.1097/DCR.0000000000003547.
- [14] Garcia-Garcia A, Orts-Escolano S, Oprea S, et al. A review on deep learning techniques applied to semantic segmentation [J]. CoRR, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1704.06857.
- [15] Kitaguchi D, Harai Y, Kosugi N, et al. Artificial intelligence for the recognition of key anatomical structures in laparoscopic colorectal surgery[J]. Br J Surg, 2023, 110(10):1355-1358. DOI: 10.1093/bjs/znad249.
- [16] Ryu S, Goto K, Kitagawa T, et al. Real-time artificial intelligence navigation-assisted anatomical recognition in laparoscopic colorectal surgery[J]. J Gastrointest Surg, 2023, 27(12): 3080-3082. DOI: 10.1007/s11605-023-05819-1.
- [17] Ryu S, Imaizumi Y, Goto K, et al. Artificial intelligence-enhanced navigation for nerve recognition and surgical education in laparoscopic colorectal surgery[J]. Surg Endosc, 2025, 39(2): 1388-1396. DOI: 10.1007/s00464-024-11489-0.
- [18] Kinoshita K, Maruyama T, Kobayashi N, et al. An artificial intelligence-based nerve recognition model is useful as surgical support technology and as an educational tool in laparoscopic and robot-assisted rectal cancer surgery[J]. Surg Endosc, 2024, 38(9): 5394-5404. DOI: 10.1007/s00464-024-10939-z.
- [19] Narihiro S, Kitaguchi D, Hasegawa H, et al. Deep learning-based real-time ureter identification in laparoscopic colorectal surgery[J]. Dis Colon Rectum, 2024, 67(10): e1596-e1599. DOI: 10.1097/DCR.0000000000003335.
- [20] 李杨,任明扬,张宏宇,等.经肛全直肠系膜切除术中困难或意外及术后并发症发生情况调查报告(一项基于全国性登记数据库的研究)[J].中国实用外科杂志,2022,42(11): 1260-1264. DOI: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2022.11.14.
- [21] Sun B, Sun Z, Li K, et al. IG-Net: an instrument-guided real-time semantic segmentation framework for prostate dissection during surgery for low rectal cancer[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2024, 257: 108443. DOI: 10.1016/j.cmpb.2024.108443.
- [22] He Z, Yang C, Diao D, et al. Anatomic patterns and clinical significance of gastrocolic trunk of Henlé in laparoscopic right colectomy for colon cancer: results of the HeLaRC trial[J]. Int J Surg, 2022, 104:106718. DOI: 10.1016/j.ijso. 2022.106718.
- [23] Ryu K, Kitaguchi D, Nakajima K, et al. Deep learning-based vessel automatic recognition for laparoscopic right hemicolectomy[J]. Surg Endosc, 2024, 38(1):171-178. DOI: 10.1007/s00464-023-10524-w.
- [24] 肖毅.直肠癌手术中肠系膜下血管的离断部位——如何从现有的证据中作出选择[J].中华胃肠外科杂志,2022,25(4):290-294. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20220106-00015.
- [25] Kitaguchi D, Takeshita N, Matsuzaki H, et al. Real-time vascular anatomical image navigation for laparoscopic surgery: experimental study[J]. Surg Endosc, 2022, 36(8): 6105-6112. DOI: 10.1007/s00464-022-09384-7.