

·述评·

热点聚焦——机器人手术系统应用于胃癌根治术的现状与未来

袁震 崔昊 卫勃

解放军总医院第一医学中心普通外科医学部, 北京 100853

通信作者: 卫勃, Email: weibo@vip.163.com

【摘要】 机器人胃癌根治术一直是胃癌微创外科领域备受关注的热点技术问题。越来越多的研究证实, 机器人手术系统与腹腔镜技术近期和远期疗效基本相当; 机器人在特定区域淋巴结清扫方面更具优势; 更精细的操作可减少术中出血量, 降低术后并发症发生率; 机器人手术系统也更符合人体工程学设计。但同时, 机器人胃癌根治术也存在手术费用较高、缺乏触觉反馈以及总手术时间延长等问题。未来机器人手术系统可能会进一步向小型化、智能化和模块化的方向发展。同时, 与人工智能技术深度结合的机器人手术系统, 将可能会在一定程度上实现消化道吻合等部分操作步骤的自动化。

【关键词】 胃肿瘤; 机器人手术; 胃切除术; 消化道重建

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1311505); 国家自然科学基金(82073192、82273231)

Current status and future prospects of robotic surgical system in radical gastrectomy for gastric cancer

Yuan Zhen, Cui Hao, Wei Bo

Department of General Surgery, The First Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Corresponding author: Wei Bo, Email: weibo@vip.163.com

【Abstract】 Robotic gastrectomy (RG) has always been a hot topic in the field of minimally invasive surgery for gastric cancer. More and more studies have confirmed that short- and long-term outcomes of RG are similar to those of laparoscopic gastrectomy. Robotic surgical systems have more advantages in specific regional lymph node dissection. More delicate operation can reduce intraoperative blood loss and the incidence of postoperative complications. Robotic surgical systems are also more ergonomically designed. However, there are also some problems such as high surgical cost, lack of tactile feedback and prolonged total operation time. In the future, robotic surgical system may be further developed in the direction of miniaturization, intelligence and modularity. At the same time, the robotic surgical system deeply integrated with artificial intelligence technology may realize the automation of some operation steps to some extent.

【Key words】 Stomach neoplasms; Robotic surgery; Gastrectomy; Digestive tract reconstruction

Fund programs: National Key Research and Development Project (2019YFB1311505); National Natural Science Foundation of China (82073192, 82273231)

手术是胃癌治疗的最有效手段, 胃癌根治术经历了从过去的开腹手术向以腹腔镜、机器人代表

的微创手术的转变。机器人手术系统相较于传统腹腔镜设备, 灵活性和稳定性更高, 便于在狭小空间

DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20221123-00486

收稿日期 2022-11-23 本文编辑 卜建红

引用本文: 袁震, 崔昊, 卫勃. 热点聚焦——机器人手术系统应用于胃癌根治术的现状与未来[J]. 中华胃肠外科杂志, 2023, 26(1): 33-37. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20221123-00486.



内开展精细操作,但存在缺乏触觉反馈、手术费用较高、大器官牵引力不足及手术时间延长等问题^[1]。机器人手术系统问世至今,应用于胃癌根治术都是以新技术的姿态出现。随着手术技术的日渐成熟,手术量也逐年攀升。加之大量研究报告的不断发表,为机器人临床应用于胃癌手术提供了越来越多的参考依据。本文将从机器人手术系统的发展和现状等角度出发,分析机器人胃癌根治术的优势和劣势,同时对机器人系统的未来发展趋势进行展望。

一、机器人胃癌根治术发展历程

2000 年,美国食品和药物管理局批准将达芬奇机器人手术系统用于一般腹腔镜外科手术^[2]。2002 年,日本 Hashizume 等^[3]报道了两例机器人辅助远端胃切除术,开启了机器人技术在胃癌手术中应用的先河。过去 20 年间,Intuitive Surgical 公司陆续发布了 DaVinci S、Si 和 Xi 等多代 4 臂手术机器人系统和 SP 单孔机器人手术系统。截至 2022 年 3 月,全球达芬奇手术系统安装量达 6 920 台,国内装机量和手术量也呈快速增长态势。随着相关专利技术的解禁和新技术的不断叠加,国内外多家制造商都参与了手术机器人系统的角逐,国内精锋、图迈、妙手、康多等手术系统也逐渐开始应用于临床。

二、机器人胃癌根治术的适应证和近远期疗效

1. 适应证:日本胃癌学会第 6 版《胃癌治疗指南》对机器人胃癌微创手术适应证的推荐仍较为谨慎,仅对临床分期为 I 期的早期胃癌患者予以弱推荐^[4]。2022 年 NCCN 指南指出,早期和局部晚期胃癌都可考虑进行腹腔镜或机器人胃切除术^[5]。最新版 ESMO 胃癌指南^[6]以及《韩国胃癌诊治指南》^[7]相对更加保守,均未明确推荐机器人应用于胃癌根治术。国内指南对于机器人胃癌根治术推荐范围较日本更为宽泛,根据《中国机器人胃癌手术指南(2021 版)》^[8]和《机器人胃癌手术中国专家共识(2021 版)》^[9]中的内容,推荐范围包括肿瘤浸润深度 $\leq$ T4a 级、术前临床分期在 II 期内的胃部肿瘤。但是在目前的临床实践中,可能有更多进展期胃癌也参与了研究性机器人手术和常规机器人手术的临床治疗。因此,就需要对这些患者的数据进行持续分析,从而为机器人胃癌根治术提供更多的循证医学证据。

2. 淋巴结清扫:胃癌根治术最重要的质控指标

就是淋巴结清扫。但事实上,目前对于机器人胃癌根治术在淋巴结清扫方面的优势仍存在争议。多项随机对照研究及荟萃分析均表明,机器人胃癌根治术相较于传统腹腔镜手术,总淋巴结清扫数目方面差异并没有统计学意义^[10-12]。但机器人手术在胰腺上区等特定区域的淋巴结清扫中可能获益。国内学者 Lu 等^[13]针对 300 例患者开展了一项随机对照试验(randomized controlled trial, RCT)研究,机器人组与腹腔镜组在总淋巴结清扫数目和清扫胃周围第 1~6 组淋巴结数目的差异没有统计学意义,但机器人组对第 7~9 组和第 11p 及第 12a 组淋巴结的获取数目显著优于腹腔镜组(17.6 枚比 15.8 枚, $P<0.05$),且该优势在第 12a 组淋巴结清扫中最为明显(2.5 枚比 1.8 枚, $P<0.05$)。日本 Son 等^[14]也报道,机器人手术系统对于非胃周淋巴结(第 7~14v 组)、胰上淋巴结(第 7~12a 组)和脾门及脾动脉淋巴结(第 10 和第 11 组)的清扫数目相较腹腔镜更多,其原因与机器人手术系统多自由度可转腕器械有关。相对于腹腔镜器械,机器人手术系统可从多个方向解剖,从相对容易的地方开始清扫淋巴结,降低对器官和血管的损伤,对于接受胃癌根治术、尤其需要保脾的全胃切除术患者,可能会带来更好的肿瘤学结局。

3. 近期疗效:机器人手术在近期疗效与安全性方面与腹腔镜手术总体相当,其在减少术中出血量、加速术后肠道功能恢复方面,具有一定优势。国内一项大宗 RCT 研究结果显示,机器人手术组比腹腔镜手术组术中失血量显著减少(41.2 ml 比 55.7 ml, $P<0.05$),且术后首次下床时间、排气时间及首次进食时间均早于腹腔镜手术组($P<0.05$)^[13]。以上优势可能得益于机器人器械的稳定性与灵活性,尤其视觉的可及性避免了对组织的过度牵拉和对血管的意外伤害,为术后快速康复奠定了基础。

机器人手术的精细化操作,理论上可在一定程度上降低手术的并发症发生率。日本 Ojima 等^[11]对 241 例胃癌患者开展的 RCT 研究发现,机器人组的术后 Clavien-Dindo II 级及以上并发症发生率显著降低(8.8% 比 29.7%, $P<0.05$)。国内 RCT 研究也表明,机器人组术后总并发症发生率更低(9.2% 比 17.6%, $P<0.05$);术后并发症分为手术并发症(包括吻合口漏、胰漏、肠梗阻等)和医疗并发症(肺炎、气胸、血栓形成等),机器人组对于术后并发症发生率降低主要在于其能够减少医疗并发症

(尤其是肺炎),而并非减少手术并发症的发生率^[13]。中、日、韩的三项 RCT 研究结果也都显示,机器人胃癌根治术相较于腹腔镜手术,在并发症发生率方面并未显示出统计学的优势^[10-11,13]。其原因可能与 3D 腹腔镜的应用有关,在共同拥有 3D 视野的情况下,腹腔镜手术的精细化水平也有一定提升^[15];也可能由于手术并发症发生率过低,而研究样本量有限,导致未能观察到有统计学意义的差异。根据日本的数据,机器人胃癌手术后吻合口漏、胰瘘和腹腔内脓肿的发生率为 4.2%、1.7% 和 2.5%^[11]。而目前几项 RCT 研究样本量均在 300 例左右,因此,仍需要通过更多大样本研究进行验证。

机器人手术时间相较于腹腔镜手术显著延长,这也是广为讨论的一个问题^[16]。韩国 Kim 等^[10]基于 434 例胃癌患者开展的前瞻性多中心试验结果显示,机器人手术平均手术时间为 221 min,较腹腔镜手术的 178 min 显著延长($P<0.001$)。机器人系统术中精细化操作可能耗费一定时间,但主要差异在于机器人系统术前准备过程较为繁琐,装机时间较长,术中器械更换、转换等无价值空闲时间较多。日本的 RCT 研究将胃癌根治术前准备时间排除在外,仅进行手术操作时间的比较,发现机器人组与腹腔镜组手术操作时间差异并无统计学意义(250 min 比 245 min)^[11]。

4. 远期疗效:关于机器人胃癌根治术患者的远期预后,目前仍缺乏强有力的循证医学证据,但多个大宗回顾性研究均支持机器人手术远期预后与腹腔镜手术相当的观点。韩国 Shin 等^[17]回顾分析了 2 084 例 I~III 期胃癌手术患者的生存情况,发现机器人手术与腹腔镜手术后的 5 年总体生存率(93.2% 比 94.2%)和 5 年无复发生存率(95.3% 比 96.3%)差异均无统计学意义。来自日本的基于 873 例患者的数据显示,机器人组的 5 年总体生存率和无复发生存率分别为 93.2% 和 90.7%,与腹腔镜组的 94.2% 和 92.6% 相比,差异没有统计学意义^[18]。我中心对 502 例患者进行了随访,也发现机器人胃癌根治术的 3 年总体生存率与无复发生存率均与腹腔镜手术相当^[19]。以上结果均来自于回顾性研究,仍需更多循证医学级别更高的前瞻性研究,对机器人手术在远期生存方面的价值进行评估。

三、机器人手术系统的优势和不足

1. 机器人手术的优势:机器人手术系统一般由

三部分组成:医生操作台、床旁机械臂系统和成像系统,其系统优势主要包括 3D 高清立体视野、手术区域 10~15 倍放大、7 个自由度的机械臂以及可滤除术者手部震颤等,这些优势更便于区分解剖层次和提高手术精细程度。目前,临床应用的机器人手术系统都属于主从式结构,其初始设计理念就是使用微创手术的方法给医生提供类似开放手术的操作感觉;同时,机器人手术系统配备的 2 个医生操作台,可由两位术者联合开展手术或者实时开展手术教学示范,可大大缩短学习曲线。韩国 Kim 等^[20]前瞻性分析了 502 例机器人胃切除术的病例数据,对 3 名外科医生的学习曲线进行分析,达到熟练水平、能合理控制并发症和手术时间的学习曲线平均是 25 例,从熟练达到精通水平则平均需要 23 例。手术量 25 例以下的手术初期并发症发生率(Clavien-Dindo $\geq$ II 级)为 20%;手术量达 89~125 例时,则显著降低至 6.4%($P<0.001$)。医生控制台的人体工程学设计,可以最大程度地减少医生疲劳以及身体损伤,有利于完成数量更多和难度更大的手术。

机器人多自由度的机械臂系统,可大大降低缝合的操作难度,为胃癌术后全腹腔内消化道重建奠定了技术基础。在操作步骤较为复杂的 Kamikawa 等吻合方式中,机器人系统的缝合优势可以得到充分体现。机器人系统不但降低了对术者缝合技巧的要求,还可以提高腔内吻合的安全性和可靠性。基于这些特点以及其他器械方面的共同发展,近年来,机器人全腔内消化道重建开展的也逐渐增多,全腔内消化道重建可以克服腹腔镜外吻合切口大、患者肠道功能恢复慢、对内环境影响大等缺点,也不影响患者的近远期疗效^[21-22]。国内目前已经制定了《机器人胃癌切除术后完全腔内消化道重建中国专家共识(2021 版)》^[23]。希望未来能有更多循证医学证据支撑,更好地发挥机器人在此方面的优势。

2. 机器人手术系统的不足:单纯从技术操作的层面上分析,机器人手术系统在胃癌根治术中应用的限制主要是部分情况下无法实现对胃等大型器官的有效牵引张力。解决该问题的方法通常是改变手术顺序,利用组织重力形成自牵引,采用更大的无创钳增加抓持组织范围以形成张力,或者增加辅助孔协助完成术野显露。另外,触觉反馈缺失导致存在一定的组织撕裂等风险,但经验丰富的术者可通过视觉代偿和调整操作杆夹持力度,粗略估计

并部分解决这一问题。有报道称,美国 TransEnterix 公司获批上市的机器人手术系统已初步具备粗略触觉反馈功能。

另外,机器人手术系统令人担忧的缺点还包括其远期疗效。虽然现有报道还没有明确发现对胃癌患者远期生存造成负面影响,但该问题仍然不可忽视,而且在其他肿瘤治疗中已提示了该问题的可能性。Ramirez 等^[24]报道,腹腔镜和机器人宫颈癌手术相对于开放性手术,3 年无复发生存率更低(91.2% 比 97.1%, $P < 0.05$)。导致这个问题的原因可能与微创手术中应用 CO_2 导致肿瘤播散有关。

此外,成本过高也是机器人手术值得注意的问题。以达芬奇手术机器人为例,中国采购价远高于美国本土价格,其设备维护费和配套的专用耗材费用价格也较高。韩国一项研究显示,机器人胃癌根治术费用高于腹腔镜手术(13 432 美元比 8 090 美元, $P < 0.001$)^[10]。本团队的一项研究也显示,机器人手术费用更高^[19]。虽然费用相对昂贵,但日本已于 2018 年将机器人胃癌根治术纳入全民医疗保障体系。目前,国内机器人手术各地医保报销情况不一,但未来随着更多机器人系统的开发和应用,手术费用有望大幅降低。

四、机器人手术系统未来发展方向

1. 小型化和单孔化:目前的机器人手术系统脱胎于工业机器人,因此一般体积巨大,灵活性欠佳。虽然新的可悬吊装置和电动平台解决了移动灵活性的问题,但未来小型化也是必然趋势。美国 Virtual Incision 公司已开发出小型便携式机器人手术设备,机身仅相当于一个机械臂大小。

机器人手术的目的主要是微创,所以从 4 臂机器人发展成单孔机器人也可能成为趋势,发展中需要解决的首要问题就是克服器械臂之间的“筷子效应”。目前,已投入临床的达芬奇 SP 单孔机器人采用可弯曲镜头和器械,已经较好地解决了该问题。笔者团队也在全球首次报道了达芬奇 SP 单孔机器人用于根治性全胃切除术,并初步证明了其安全性与可行性^[25]。设备和器械的小型化将可能为单孔化发展奠定基础。首先,可以在单孔中置入更多小尺寸器械,解决牵引和张力问题;同时,可以采用高顺应性的结构新材料、记忆合金等材料实现刚柔转换^[26-27]。甚至将超声刀的功能也集合在可弯曲材料上,从而更充分地发挥单孔手术微创的优势。

2. 自动化和智能化:主从式结构的手术机器

人,可以减轻医生的工作负担,但仍未将医生从简单重复的劳动中解放出来。未来人工智能、机器学习等与手术机器人系统的结合,将有望提高手术精度、甚至实现部分操作的自动化。2022 年, Saeidi 等^[28]报道一款新开发的智能组织自主机器人(STAR),已可以脱离医生并能在实验动物内独立完成小肠吻合术,虽然该缝合技术仍然处于雏形阶段,但该系统的设计理念已经将手术机器人的作用从辅助手术升级进化到直接参与手术。在智能化的发展进程中,诸如荧光显影成像功能已经在新一代 DaVinci XI 系统上集成,力反馈的功能也在 Senhance 系统中开始应用,未来的智能平台将具有更多和创新技术兼容及对接功能,或者直接以模块化的形式与腹腔镜组合,取长补短,同时发挥两种微创外科设备的优势,并最终提高胃癌手术质量和诊治效果。

机器人手术系统在胃癌根治术中的应用可在一定程度上弥补传统腹腔镜的不足,其近期安全性与远期疗效仍需更多研究结论的支持和验证。未来机器人系统的改进和发展,可以继续提升机器人手术的技术优势,发挥其在胃癌根治术中的独特作用。而结合人工智能与新型材料的机器人手术系统,将有望成为胃癌微创外科领域的潜在变革性力量。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 余佩武, 李政焰. 机器人胃癌手术的未来前景[J]. 中华胃肠外科杂志, 2022, 25(8): 682-685. DOI: 10.3760/cma.j.cn44-1530-20220507-00201.
- [2] Terashima M. The 140 years' journey of gastric cancer surgery: from the two hands of Billroth to the multiple hands of the robot[J]. Ann Gastroenterol Surg, 2021, 5(3): 270-277. DOI: 10.1002/ags3.12442.
- [3] Hashizume M, Shimada M, Tomikawa M, et al. Early experiences of endoscopic procedures in general surgery assisted by a computer-enhanced surgical system[J]. Surg Endosc, 2002, 16(8): 1187-1191. DOI: 10.1007/s004640080154.
- [4] Japanese Gastric Cancer Association. Japanese Gastric Cancer Treatment Guidelines 2021 (6th edition) [J]. Gastric Cancer, 2022. DOI: 10.1007/s10120-022-01331-8.
- [5] Ajani JA, D'Amico TA, Bentrem DJ, et al. Gastric cancer, version 2.2022, NCCN Clinical Practice Guidelines in oncology[J]. J Natl Compr Canc Netw, 2022, 20(2): 167-192. DOI: 10.6004/jnccn.2022.0008.
- [6] Lordick F, Carneiro F, Cascinu S, et al. Gastric cancer: ESMO Clinical Practice Guideline for diagnosis, treatment and follow-up[J]. Ann Oncol, 2022, 33(10): 1005-1020. DOI: 10.1016/j.annonc.2022.07.004.

- [7] Guideline Committee of the Korean Gastric Cancer Association (KGCA), Development Working Group & Review Panel. Korean Practice Guideline for gastric cancer 2018: an evidence-based, multi-disciplinary approach [J]. J Gastric Cancer, 2019, 19(1): 1-48. DOI: 10.5230/jgc.2019.19.e8.
- [8] 马云涛, 卢婷婷, 马世勋, 等. «中国机器人胃癌手术指南»解读 [J/CD]. 中华腔镜外科杂志(电子版), 2021, 14(4): 193-200. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2021.04.001.
- [9] 中国研究型医院学会机器人与腹腔镜外科专业委员会, 中国抗癌协会胃癌专业委员会. 机器人胃癌手术中国专家共识(2021版)[J]. 中华消化外科杂志, 2022, 21(1): 1-9. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20211214-00652.
- [10] Kim HI, Han SU, Yang HK, et al. Multicenter prospective comparative study of robotic versus laparoscopic gastrectomy for gastric adenocarcinoma[J]. Ann Surg, 2016, 263(1): 103-109. DOI: 10.1097/SLA.0000000000001249.
- [11] Ojima T, Nakamura M, Hayata K, et al. Short-term outcomes of robotic gastrectomy vs laparoscopic gastrectomy for patients with gastric cancer: a randomized clinical trial[J]. JAMA Surg, 2021, 156(10): 954-963. DOI: 10.1001/jamasurg.2021.3182.
- [12] Guerrini GP, Esposito G, Magistri P, et al. Robotic versus laparoscopic gastrectomy for gastric cancer: the largest meta-analysis[J]. Int J Surg, 2020, 82: 210-228. DOI: 10.1016/j.ijsu.2020.07.053.
- [13] Lu J, Zheng CH, Xu BB, et al. Assessment of robotic versus laparoscopic distal gastrectomy for gastric cancer: a randomized controlled trial[J]. Ann Surg, 2021, 273(5): 858-867. DOI: 10.1097/SLA.0000000000004466.
- [14] Son T, Lee JH, Kim YM, et al. Robotic spleen-preserving total gastrectomy for gastric cancer: comparison with conventional laparoscopic procedure[J]. Surg Endosc, 2014, 28(9): 2606-2615. DOI: 10.1007/s00464-014-3511-0.
- [15] 崔昊, 刘国晓, 邓欢, 等. 机器人与 3D 腹腔镜辅助远端胃癌 D2 根治术近期疗效比较[J]. 中华胃肠外科杂志, 2020, 23(4): 350-356. DOI: 10.3760/cma.j.cn.441530-20200224-00085.
- [16] 刘江, 阮虎, 赵坤, 等. 达芬奇机器人与腹腔镜行胃癌根治术的对照研究[J]. 中华胃肠外科杂志, 2014, 17(5): 461-464. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0274.2014.05.013.
- [17] Shin HJ, Son SY, Wang B, et al. Long-term comparison of robotic and laparoscopic gastrectomy for gastric cancer: a propensity score-weighted analysis of 2 084 consecutive patients[J]. Ann Surg, 2021, 274(1): 128-137. DOI: 10.1097/SLA.0000000000003845.
- [18] Li ZY, Zhao YL, Qian F, et al. Long-term oncologic outcomes of robotic versus laparoscopic gastrectomy for locally advanced gastric cancer: a propensity score-matched analysis of 1 170 patients[J]. Surg Endosc, 2021, 35(12): 6903-6912. DOI: 10.1007/s00464-020-08198-9.
- [19] Gao Y, Xi H, Qiao Z, et al. Comparison of robotic- and laparoscopic-assisted gastrectomy in advanced gastric cancer: updated short- and long-term results[J]. Surg Endosc, 2019, 33(2): 528-534. DOI: 10.1007/s00464-018-6327-5.
- [20] Kim MS, Kim WJ, Hyung WJ, et al. Comprehensive learning curve of robotic surgery: discovery from a multicenter prospective trial of robotic gastrectomy[J]. Ann Surg, 2021, 273(5): 949-956. DOI: 10.1097/SLA.0000000000003583.
- [21] 郑华龙, 林嘉, 黄昌明. 机器人胃癌根治术消化道重建的技术难点及其对策[J]. 中华胃肠外科杂志, 2022, 25(5): 392-395. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20220304-00083.
- [22] Luo R, Liu D, Ye S, et al. Short- and long-term outcomes of totally robotic versus robotic-assisted radical distal gastrectomy for advanced gastric cancer: a mono-institution retrospective study[J]. World J Surg Oncol, 2019, 17(1): 188. DOI: 10.1186/s12957-019-1722-5.
- [23] 中国医师协会外科医师分会上消化道外科学组, 中华医学会外科学分会胃肠外科学组, 中国研究型医院学会消化道肿瘤专业委员会, 等. 机器人胃癌切除术后完全腔内消化道重建中国专家共识(2021版)[J]. 中华胃肠外科杂志, 2021, 24(8): 647-652. DOI: 10.3760/cma.j.issn.441530-20210727-00299.
- [24] Ramirez PT, Frumovitz M, Pareja R, et al. Minimally invasive versus abdominal radical hysterectomy for cervical cancer[J]. N Engl J Med, 2018, 379(20): 1895-1904. DOI: 10.1056/NEJMoa1806395.
- [25] Cui H, Cui JX, Zhang KC, et al. Can a single-port robot be safely used for robotic total gastrectomy for advanced gastric cancer? First experience using the da Vinci SP platform[J]. Gastroenterol Rep (Oxf), 2022, 10: goac023. DOI: 10.1093/gastro/goac023.
- [26] Wang Y, Yang Z, Zhou H, et al. Inflatable particle-jammed robotic gripper based on integration of positive pressure and partial filling[J]. Soft Robot, 2022, 9(2): 309-323. DOI: 10.1089/soro.2020.0139.
- [27] Zhou J, Chen Y, Hu Y, et al. Adaptive variable stiffness particle phalange for robust and durable robotic grasping [J]. Soft Robot, 2020, 7(6): 743-757. DOI: 10.1089/soro.2019.0089.
- [28] 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.