·专题论坛·

柔性消化内镜手术机器人的研发现状与展望

李茂生 左秀丽 季锐
山东大学齐鲁医院消化内科,济南 250012
通信作者:季锐,Email:qljirui@163.com

【摘要】 随着腔镜手术机器人在微创外科手术中的广泛应用,机器人技术逐渐延伸到消化内镜等柔性内镜手术领域。越来越多的研究表明,手术机器人同样可以提升柔性内镜手术的操作效率和安全性,优化学习曲线。但由于消化道管腔狭窄曲折,柔性消化内镜手术机器人的研发及设计难度相对更大。本文从载体长度、柔性和人体工程学等方面介绍柔性消化内镜手术机器人的研发特点,并对其未来的临床应用进行展望,以期助力柔性手术机器人在自然腔道微创手术中的应用。

【关键词】 消化内镜; 柔性手术机器人; 人体工程学
基金项目:泰山学者工程专项经费资助(tsqn202312333)

Development status and prospect of flexible endoscopic digestive surgery robots

Li Maosheng, Zuo Xiuli, Ji Rui
Department of Gastroenterology, Qilu Hospital of Shandong University, Jinan 250012,China
Corresponding author: Ji Rui, Email: qljirui@163.com

【 **Abstract** 】 With the extensive application of surgical robots represented by Da Vinci in minimally invasive surgical procedures, robotic technology has gradually extended to the field of flexible endoscopic surgery like digestive endoscopy. Many studies have shown that surgical robots can also improve the operational efficiency and safety of flexible endoscopic surgery and optimize the learning curve. However, due to the narrow and tortuous lumen of digestive tract, the development and design of flexible digestive endoscopic surgical robot is relatively more difficult. In this paper, the research and development characteristics of the flexible digestive endoscopic surgical robot are introduced from the aspects of carrier length, flexibility and ergonomics, and its future clinical application is prospected, with a view to facilitating the application of the flexible surgical robot in the minimally invasive surgical procedures of natural passages such as digestive, respiratory and urinary tract.

【 **Key words** 】 Digestive endoscopy; Flexible surgical robot; Ergonomics
Fund program: Taishan Scholars Program of Shandong Province (tsqn202312333)

随着微创手术在外科中的迅速发展,以达芬奇机器人为代表的硬性腔镜手术机器人获得了越来越广泛的应用,目前在全球范围内已完成了超过600万例手术[1-2]。与硬性腔镜手术机器人的蓬勃发展相比,经自然腔道手术的柔性内镜手术机器人起步相对较晚。常见的经自然腔道内镜手术入路包括经消化道、经呼吸道与经泌尿生殖系统腔道。操作中需将手术器械沿人体狭窄细长、弯曲多变的腔道路径达到病灶位置,并进行精细的手术操作。因其高灵活性与柔顺适应性等优势,柔性手术器械可更好地适应狭窄腔道解剖结构的约束。

目前,内镜下微创治疗已成为消化道早期肿瘤的

DOI:10.3760/cma.j.cn441530-20240609-00204
收稿日期 2024-06-09 **本文编辑** 朱雯洁
引用本文:李茂生, 左秀丽, 季锐. 柔性消化内镜手术机器人的研发现状与展望[J]. 中华胃肠外科杂志, 2024, 27(8): 784-788. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20240609-00204.

标准治疗方式。以内镜下黏膜剥离术(endoscopic submucosal dissection,ESD)为例,ESD 术通过单根柔性内镜进行,对内镜操作技术要求高,学习曲线长;术中单器械的局限缺乏有效组织牵引,难以形成类似腹腔镜手术中的操作三角,导致术中出血和穿孔的风险增加,在一定程度上限制了该技术的推广普及[3-4]。机器人技术能够较好地克服上述缺点,成为解决柔性内镜手术难题的重要途径[5]。根据目前柔性搭载平台的可获得性,消化内镜手术机器人可以分为专用型内镜机器人(需专用设计生产的内镜机器人,包括 STRAS、Flex、Endoluminal 等系统)和普通内镜整合型机器人(可与普通内镜组装使用的内镜机器人,包括 EndoMASTER、TAESR 和 PETH 系统等)[6]。国内消化内镜机器人系统紧跟发展方向,目前已有单臂 EndoFaster、双臂 EndoDreams 和 YunSRobot 等系统研发应用。

柔性内镜手术机器人的核心技术壁垒较高,其研发难点可以总结为以下 3 点:一是内镜载体的尺寸限制大,需严格控制手术器械工具尺寸;二是器械机构细长柔软,操作端与执行端距离较远,操作力在传输过程中损失较大,需在狭窄多弯曲的管腔内找到力量和灵活度的平衡;三是人体工程学要求高,在操作过程中缺少力的感知和反馈,动态可变需形成有效的人机交互。本文结合笔者所在团队研发国产消化内镜机器人 EndoDreams 系统的经验,从研发角度对上述几项难点展开讨论。

一、尺寸控制

消化内镜手术机器人的目标部位是食管、胃和结直肠,因此,其尺寸(长度和直径)应该适应消化道固有管径的需求。进入体内部分的直径主要受到食管生理性狭窄的限制,为避免食管入口处的机械性损伤,上消化道内镜直径基本都在 14 mm 以下。消化内镜长度主要由消化道长度、尤其是结直肠长度决定,目前的结肠镜长度多在 120~140 cm 之间。拟完成上下消化道手术,手术机器人的机械臂需要满足上述尺寸的要求。

消化内镜手术机器人的主要组成模块包括 4 个部分:控制台、持镜架、内镜系统和装配柔性手术器械的机械臂。目前内镜搭载机械臂的方式主要有以下 3 种:(1)穿过内镜原有的通道;(2)在内镜外额外附加工作通道;(3)使用外套管,将机械臂与内镜同时包裹[7]。无论是哪种搭载方式,均对机械臂的直径有很大限制。如 Flex 系统采用 B 方式外挂两条工作通道,其镜身尺寸为 28 mm×18 mm,只能适用于结肠手术[8]。便携式内镜机器人 PETH 系统采用 B 方式附加单条工作通道,使内镜直径达到约 15 mm,会降低患者内镜下治疗的耐受性[9]。

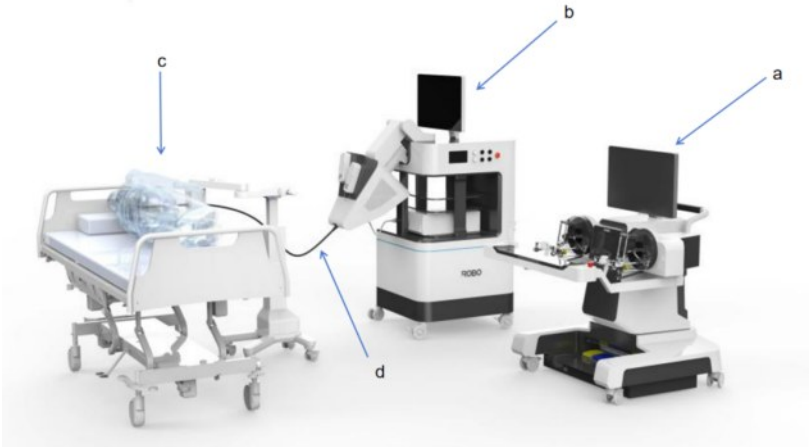
此外,机械臂的直径还与其末端手术执行器的结构有关。手术执行器应用多自由度腕关节提高其灵巧度,其直径与腕关节的设计种类相关,主要可分为串联关节、并联关节和连续体结构[10]。(1)串联关节:由几个短的刚性连杆组成,是目前腹腔镜手术机器人中最常见的腕关节结构,达芬奇机器人系统的 Endowrist 腕关节即属于此类[11]。消化内镜中 EndoMaster 系统也采用了串联关节设计[12]。(2)柔性并联腕关节:将柔性材料与并联结构结合,保留连续体的柔软性和顺应性的同时,又保留了刚性并联关节的强度和稳定性,可为手术机器人提供更灵活和精细的操作[13]。因为使用柔性材料和紧凑的设计,直径相对可以缩小。(3)连续体:没有明显的关节结构,仅依靠材料形变发生连续变形,产生曲线运动,如 Endoluminal Surgical 系统的手术器械采用该结构[14]。

因此,将柔性并联腕关节作为手术执行器的结构能有效减少其直径,适应人体消化道狭窄的特点。山东大学牵头研发的 EndoDreams 系统的手术执行器采用了柔性并联腕关节的结构,使用 4 个支链实现腕关节的运动,其末端集成了 3 种手术器械,分别为注射针、电刀和夹钳,直径分别为 3.5 mm、2.5 mm 和 3 mm,既缩小了执行器直径,又能满足手术需要。见图 1[15]。

理想的内镜手术机器人应该满足消化道长度需求。目前的消化道手术机器人柔性部分长度普遍较短,如 STRAS 系统原型机柔性部分的长度仅为 65 cm,仅能到达降结肠或近端胃,无法切除更深入的病变[16]。而 Flex 手术机器人系统的柔性部分更短,仅允许切除距离肛门边缘 25 cm 及以内的病变[8]。长度的限制可能与关节和连杆的结构、电缆的长度和传输能力以及机械臂强度和稳定性有关。所以,消化内镜手术机器人若想能够同时完成上、下消化道的手术,就需要解决长度不足的问题。

二、柔性和刚度

胃肠道具有柔软和多曲的特点,因此,手术机器人的机械臂应具有一定的柔顺性,以保证其能安全到达手术部位。同时为了完成目标区域的手术



注:a.主手控制台;b.持镜架与胃镜系统;c.手术台;d.机械臂与柔性手术器械

图1 EndoDreams机器人系统组成图[15]

操作,机械臂还应该具有一定的刚度,以对抗组织的拉力和完成病变的提拉。

柔性手术机械臂可以简单分为驱动侧、传动机构和末端执行器三部分。在传动机构中,医疗机器人常用腱-鞘传动机构,“鞘”指不同材料的管道,内装不同材质的金属丝作为“腱”。手术机器人通过驱动下达指令,金属丝传导指令到末端的手术器械,从而完成操作。传动机构的管道穿梭于内镜通道或者搭载于内镜外直接接触消化道,故其材料需要满足生物相容性和柔性要求。金属丝在初始状态下无法张紧、或通过丝传动控制末端器械运动时丝和管道间存在间隙等问题,容易导致末端手术器械的控制产生误差。故柔性手术机器人的设计的第二大困难就是,如何减少传统腱-鞘结构带来的器械控制误差和如何同时满足手术执行器柔性和刚度的需求等困难。

为了实现两者的结合,笔者所在EndoDreams系统设计团队采用了变刚度连续体柔性操作臂和柔性并联腕关节的设计。变刚度操作臂采用多个链式单元模块串联的连续体结构作为手术执行器的操作臂,根据其中超弹镍钛丝的弯曲运动和张紧程度变化,实现操作臂的运动和刚度调节:较低的刚度用以保证操作臂顺利通过内镜工作平台通道,较高刚度用以提供较大的负载,提高手术操作的精确性和稳定性。柔性并联腕关节不仅具有并联结构精度高、负载大和运动稳定等优势,还因为采用了柔性结构作为链接关节而减少了体积,结构紧凑,降低了加工成本,为柔性与刚度折中问题提供了一个答案。

三、人体工程学

人体工程学是研究工作者与其工作环境的相互作用,效率、总体性能和工作者舒适程度是其关键组成部分[17]。以传统的腹腔镜和开腹手术为例,近年开展的一项Meta分析显示,12%的医生因为工作相关肌肉骨骼疾病而休假、停止手术和提前退休,医生的劳累程度和职业损伤较高[18]。而内镜手术机器人的研发,有望改善手术过程中的人体工程学,减少医生的劳累程度。

机器人相关的人体工程学中,最受关注的三个方面包括手术可视化、术者的负担和缺乏力觉反馈[16]。可视化的困难分为两部分:图像质量差和视线障碍。如在达芬奇机器人中,高清三维可视化能提供良好的解剖识别和深度知觉,但在内镜机器人系统中,由于内镜或者外套管的空间限制,图像质量较差,这就要求开发实时的超分辨率技术,以获得更清晰的图像。此外,由于内镜的镜头往往与器械平行放置,手术器械位于视线范围内,可能会遮挡患处,难以获得理想的手术视野。手术机器人附带的机械臂可以执行牵引的功能,在狭小的内镜视野中形成操作三角。国内山东大学齐鲁医院与深圳罗博医疗设计的EndoFaster机器人在一项随机对照离体研究中显示,Faster辅助ESD的总手术时间明显短于常规ESD、直视解剖率明显高于常规ESD[19]。比起常规ESD的“单手操作”,机器人辅助的ESD达到了“双手操作”的目的,可部分解决内镜手术中可视化的难题。

常规ESD手术时,维持站姿、长时间操作和抬头观看屏幕增加了术者的身体负担。而手术机器人可以实现坐位手术,屏幕与视线平齐,工作台高

度与术者肘部平齐，显著降低身体负担、减少劳累。例如EndoMaster、EndoDreams等系统均采用了主从遥操作模式，内镜医师可以从远处的操作台通过手柄控制机械臂，而不用长时间立于患者身旁[12,20-21]。医生的脑力负担是指医生应该专注于完成手术，而不是专注于该按哪个按钮，或该踩哪个脚踏板。这就要求手术机器人的设计能够让医生较容易地在脑海中将机器人操作臂的运动转化为执行器尖端的运动，从而缩短医生的学习曲线。例如，通过前后移动、旋转操作臂实现镜下夹钳的来回移动和旋转，尽力使医生感觉仿佛在使用自己的手进行操作[7]。这就要求柔性手术机器人系统中的力平衡主手能够实现任何位置的悬停，适应医生们的操作习惯从而减少医生的负荷。

此外，在传统的内镜手术中，医生可以通过手指感受器械及内镜末端与组织的交互作用力。然而，手术机器人主、从遥操作的控制方式将操作者与手术执行器分开，医生在手术时只能通过视觉观察组织的形变来估计器械与组织的相互作用力，缺乏力的感知[22]。由于力的估计并不准确，医生在使用机械臂夹持黏膜或组织时，容易用力不当，造成黏膜脱落或组织损伤。有研究表明，在达芬奇手术机器人中加入触觉反馈，可以降低手术器械的抓取力，在满足视野暴露的同时，减少组织不必要的损伤[23]。但力反馈的研究比较困难，目前市面鲜有包括力反馈的内镜机器人系统。在EndoDreams机器人系统中，我们尝试将力传感器与柔性手术执行器进行集成，当使用夹钳夹取组织时，反作用力被夹钳内部的力传感器接受，反映到操作手的关节上，从而完成力的感知。

四、未来方向

全流程化手术机器人：目前腔内柔性手术机器人的研究主要以末端器械的使用为主，如EndoMaster系统和EndoSAMURAI系统，手术过程中，其内镜的进退导航仍需要助手手动控制，完成镜头的大幅度移动或器械的更换[24]。此外，也有部分持镜机器人的主要功能是控制内镜运动，如RAFE系统被研发以远程单人控制内镜的移动[25]。可以预见，能集成机器人辅助内镜导航和机器人化器械平台用于完全腔内手术的机器人系统将是未来的趋势。Kume等[26]尝试开发了两种功能兼具的ETRS系统，并成功利用该系统在猪胃中完成了ESD手术，但其安全性、可靠性仍然存在很多问题，推广应用困难。国内目前的第二代EndoDreams已能够进行操作全流程化，可实现单人操控内镜移动和镜下手术。

内镜机器人在缝合方面的应用：随着内镜手术的普及，医生们对内镜手术后创面的处理也越来越重视。目前内镜下缝合技术包括金属夹相关缝合、线辅助金属夹缝合、尼龙绳辅助金属缝合和特殊的缝合装置等缝合方法[27]。柔性手术机器人可以在镜下提供更好的手术视野、适当地反牵引、高精度操作和引入特殊的器械，为内镜下缝合创造更多可能性，为未来经自然腔道内镜手术提供了更广阔的空间。

五、小结

随着内镜检查和治疗技术的不断进展，柔性内镜手术机器人将越来越被重视。机器人技术的应用，将传统内镜手术中的视野暴露和牵引等问题简化，有望缩短医生的学习曲线，提升手术效率和安全性。未来随着5G技术、人工智能和遥操作等技术的发展，内镜手术可以实现真正异地、全流程化操作。随着新材料的发现和新结构的设计，直径、柔性和人体工学等设计困难也将更易被克服，相信更加智能、更加实用的柔性机器人将会不断出现，造福更多患者。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参　考　文　献

[1] Ng AT, Tam PC. Current status of robot-assisted surgery[J]. Hong Kong Med J, 2014, 20(3): 241-250. DOI: 10.12809/hkmj134167.

[2] Svoboda E. Your robot surgeon will see you now[J]. Nature, 2019, 573(7775): S110-S111. DOI: 10.1038/d41586-019-02874-0.

[3] Kaan HL, Ho KY. Robot-assisted endoscopic resection: current status and future directions[J]. Gut Liver, 2020, 14(2):150-152. DOI: 10.5009/gnl19047.

[4] 张波, 令狐恩强, 柴宁莉, 等. 内镜黏膜下剥离术治疗胃黏膜病变术后复发相关因素分析[J]. 中华消化内镜杂志, 2018, 35(1): 32-36. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1007-5232.2018.01.006.

[5] Cui Y, Thompson CC, Chiu P, et al. Robotics in therapeutic endoscopy (with video) [J]. Gastrointest Endosc, 2022, 96(3):402-410. DOI: 10.1016/j.gie.2022.05.019.

[6] 李清敏, 左秀丽, 季锐. 消化内镜手术机器人发展现状及展望[J]. 中华消化内镜杂志, 2023, 40(3):173-177. DOI: 10.3760/cma.j.cn321463-20211206-00684.

[7] Kim J, De Mathelin M, Ikuta K, et al. Advancement of flexible robot technologies for endoluminal surgeries[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(7): 909-931. DOI: 10.1109/jproc.2022.3170109.

[8] Turiani Hourneaux de Moura D, Aihara H, Jirapinyo P, et al. Robot-assisted endoscopic submucosal dissection

versus conventional ESD for colorectal lesions: outcomes of a randomized pilot study in endoscopists without prior ESD experience (with video) [J]. Gastrointest Endosc, 2019, 90(2):290-298. DOI: 10.1016/j.gie.2019.03.016.

[9] Hwang M, Lee SW, Park KC, et al. Evaluation of a robotic arm-assisted endoscope to facilitate endoscopic submucosal dissection (with video) [J]. Gastrointest Endosc, 2020,91(3):699-706. DOI: 10.1016/j.gie.2019.11.014.

[10] Burgner-Kahrs J, Rucker DC, Choset H. Continuum robots for medical applications: a survey[J]. IEEE Trans Robot, 2015, 31(6): 1261-1280. DOI:10.1109/tro.2015.2489500.

[11] Freschi C, Ferrari V, Melfi F, et al. Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator[J]. Int J Med Robot, 2013, 9(4):396-406. DOI: 10.1002/rcs.1468.

[12] Ho KY, Phee SJ, Shabbir A, et al. Endoscopic submucosal dissection of gastric lesions by using a Master and Slave Transluminal Endoscopic Robot (MASTER) [J]. Gastrointest Endosc, 2010, 72(3):593-599. DOI: 10.1016/j.gie.2010.04.009.

[13] Bryson CE, Rucker DC, Ieee. Toward parallel continuum manipulators[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014: 778-785.

[14] Atallah S, Sanchez A, Bianchi E, et al. Envisioning the future of colorectal surgery: preclinical assessment and detailed description of an endoluminal robotic system (ColubrisMX ELS) [J]. Tech Coloproctol, 2021,25(11):1199-1207. DOI: 10.1007/s10151-021-02481-0.

[15] ROBO. 多通道消化内镜手术机器人系统(在研)[EB/OL]. (2023-09-27) [2024-06-09]. http://www. docrobo. com/product/1.html#cont2.

[16] Zorn L, Nageotte F, Zanne P, et al. A novel telemanipulated robotic assistant for surgical endoscopy: preclinical application to ESD[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2018, 65(4):797-808. DOI: 10.1109/TBME.2017.2720739.

[17] Wong SW, Ang ZH, Yang PF, et al. Robotic colorectal surgery and ergonomics[J]. J Robot Surg, 2022,16(2):241-246. DOI: 10.1007/s11701-021-01240-5.

[18] Epstein S, Sparer EH, Tran BN, et al. Prevalence of work-related musculoskeletal disorders among surgeons and interventionalists: a systematic review and meta-analysis[J]. JAMA Surg, 2018, 153(2): e174947. DOI: 10.1001/jamasurg.2017.4947.

[19] Ji R, Yang JL, Yang XX, et al. Simplified robot-assisted endoscopic submucosal dissection for esophageal and gastric lesions: a randomized controlled porcine study (with videos) [J]. Gastrointest Endosc, 2022, 96(1): 140-147. DOI: 10.1016/j.gie.2022.01.004.

[20] Phee SJ, Low SC, Sun ZL, et al. Robotic system for no-scar gastrointestinal surgery[J]. Int J Med Robot, 2008, 4(1): 15-22. DOI: 10.1002/rcs.179.

[21] Phee SJ, Reddy N, Chiu PW, et al. Robot-assisted endoscopic submucosal dissection is effective in treating patients with early-stage gastric neoplasia[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2012,10(10):1117-1121. DOI: 10.1016/j.cgh.2012.05.019.

[22] Okamura AM. Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery[J]. Curr Opin Urol, 2009, 19(1):102-107. DOI: 10.1097/MOU.0b013e32831a478c.

[23] King CH, Culjat MO, Franco ML, et al. Tactile feedback induces reduced grasping force in robot-assisted surgery [J]. IEEE Trans Haptics, 2009,2(2):103-110. DOI: 10.1109/TOH.2009.4.

[24] Ikeda K, Sumiyama K, Tajiri H, et al. Evaluation of a new multitasking platform for endoscopic full-thickness resection[J]. Gastrointest Endosc, 2011, 73(1): 117-122. DOI: 10.1016/j.gie.2010.09.016.

[25] Iwasa T, Nakadate R, Onogi S, et al. A new robotic-assisted flexible endoscope with single-hand control: endoscopic submucosal dissection in the ex vivo porcine stomach [J]. Surg Endosc, 2018, 32(7): 3386-3392. DOI: 10.1007/s00464-018-6188-y.

[26] Kume K, Sakai N, Ueda T. Development of a novel gastrointestinal endoscopic robot enabling complete remote control of all operations: Endoscopic Therapeutic Robot System (ETRS) [J]. Gastroenterol Res Pract, 2019, 2019:6909547. DOI: 10.1155/2019/6909547.

[27] 李建军, 樊超强, 柏健鹰. 内镜缝合技术在临床中的应用进展[J/CD]. 中华胃肠内镜电子杂志, 2021,8(2):80-85. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-7157.2021.02.008.