

## · 综 述 ·

## 达芬奇手术机器人的应用进展

嵇 武综述, 李 宁, 黎介寿 审校

【摘要】 手术机器人在微创的基础上, 以前所未有之优势将手术的精度提升到了一个全新的高度。在国外已广泛应用于心胸外科、泌尿外科、妇科和腹部外科等手术, 国内也有数家医院开始应用手术机器人, 取得了良好的效果。一个以手术机器人为代表、以信息化处理为标志的新的外科手术时代即将来临。本文系统介绍手术机器人的构成、技术特点和应用进展, 探讨存在的问题和发展方向。

【关键词】 手术机器人; 腹腔镜; 微创外科

中图分类号: R616 文献标志码: A 文章编号: 1672-271X(2010)05-0427-04

近年来兴起的手术机器人技术在微创的基础上, 将手术的精度和可行性提升到了一个全新的高度, 引起学术界的广泛关注, 甚至有人预言一个以手术机器人为代表、以信息化处理为标志的新的外科手术时代即将来临<sup>[1-2]</sup>。目前, 国外手术机器人已在心胸外科、泌尿外科、妇科和腹部外科等领域逐渐普及<sup>[3-6]</sup>, 国内也有数家医疗单位陆续引进代表当今手术机器人最高水平的达芬奇(da Vinci)手术机器人, 并迅速投入运用。

## 1 达芬奇手术机器人的构成与特点

达芬奇手术机器人由美国 Intuitive Surgical 公司生产, 目前国内购置的是第三代高清型(da Vinci S), 有三个部分组成: ①手术医师的操作主控台。②机械臂、摄像臂和手术器械组成的移动平台。③三维成像视频影像平台。实施手术时外科医生不与患者直接接触, 通过三维视觉系统和动作定标系统操作控制, 医生手臂、手腕和手指的动作通过传感器在计算机中记录下来, 并同步翻译给机器手臂, 机械手臂的前端安装各种特殊的手术器械模拟外科医生的技术动作, 完成手术操作。达芬奇手术机器人除继承了腹腔镜手术微创的优点外, 其优越性表现在<sup>[7-8]</sup>: 手术器械上的关节具有多个活动自由度, 更加灵活, 拓展了手术人员的操作能力, 提高手术精度; 在手术中手术器械可滤除人手自然颤动; 系统末端的手术器械具有牵引、切割、缝合等多种功能, 能在狭小空间操作精细手术; 高分辨率的三维图像处

理设备, 便于外科医生清晰精确地进行组织定位和器械操作; 术者可采取坐姿进行手术操作, 利于完成长时间、复杂的手术。

## 2 从外科手术的发展比较手术机器人的技术优势

18 世纪 80 年代, 医学先驱 Billroth 打开了患者的腹腔, 完成了人类历史上首例腹部外科手术, 这种传统的开腹(开胸)手术被称为第一代外科手术, 一直沿用至今。20 世纪 80 年代, 以腹腔镜技术为标志的微创手术取得突破性进展, 在许多外科领域取代传统手术, 被称为第二代外科手术。进入 21 世纪, 以 da Vinci 为代表的手术机器人开发并迅速投入临床应用, 以其全新的理念和技术优势被认为是外科发展史上的又一次革命, 也预示着第三代外科手术时代的来临。三代外科手术技术特点的比较见表 1。

## 2 手术机器人的临床应用

**2.1 心胸外科** 开放式心胸外科手术需要开胸, 分离胸骨, 游离肋骨, 在体外循环下完成, 手术创伤大, 手术风险高, 术后恢复时间长。胸腔镜已用于肺叶切除、冠状动脉搭桥等心胸外科手术, 这种微创的手术方法不用开胸, 仅需在肋间作几个小切口, 就能完成手术操作, 患者痛苦小, 术后恢复快。但其适用范围有限, 无法完成一些解剖结构复杂的手术, 因而开展并不普及。手术机器人最早于 1999 年完成了首例冠状动脉旁路移植术, 2003 年起用于各种心脏外科直视手术。它在不破坏胸廓完整性的前提下, 能精准地完成手术操作, 而且适应证范围广泛, 几乎涵盖所有的心胸外科手术<sup>[9-11]</sup>, 如心脏外科的全腔内心脏搭桥、心脏不停跳取乳内动脉、二尖瓣成形、二

作者简介: 嵇 武(1969-), 男, 江苏灌南人, 博士, 主任医师, 从事微创外科工作

作者单位: 210002 江苏南京, 南京军区南京总医院全军普通外科研究所

表 1 三代外科手术技术特点的比较

	传统开放手术	腹腔镜手术	da Vinci 机器人手术
眼手协调	自然的眼手协调	眼手协调降低,视觉范围和操作器械的手不再同一个方向	图像和控制手柄在同一个方向,符合自然的眼手协调
手术控制	术者直接控制手术野,但不精细,有时受限制	术者须和持镜的助手配合,才能看到自己想看的视野	术者自行调整镜头,直接看到想看的视野
成像技术	直视三维立体图像,但细微结构难以看清	二维平面图像,分辨率不够高,图像易失真	直视三维立体高清图像,放大 10~15 倍,比人眼更清晰
灵活性和精准程度	用手指和手腕控制器械,直观、灵活,但有时达不到理想的精度	器械只有 4 个自由度,不如人手灵活、精确	仿真手腕器械有 7 个自由度,比人手更灵活、准确
器械控制	直观的同向控制	套管逆转器械的动作,医生需反向操作器械	器械完全模仿术者的动作,直观的同向控制
稳定性	人手存在自然的颤抖	套管通过器械放大了人手的震颤	控制器自动滤除震颤,比人手稳定
创伤性	创伤较大,术后恢复慢	微创,术后恢复较快	微创,术后恢复较快
安全性	常规的手术风险	常规的手术风险外,存在一些机械故障的可能	常规的手术风险外,死机等机械故障的概率大于腔镜手术系统
术者姿势	术者站立完成手术	术者站立完成手术	术者采取坐姿,利于完成长时间、复杂的手术

尖瓣置换、房间隔缺损修补、三尖瓣成形、心脏肿瘤切除、胸外科的肺叶切除、食管癌切除、胸腺切除和食管失弛缓症的治疗等。其中,全腔内心脏搭桥手术和二尖瓣成形手术是手术机器人在心胸外科开展的代表手术。临床应用表明手术机器人的手术安全性高,疗效明显好于开放式手术和胸腔镜手术<sup>[12-13]</sup>。经过 10 余年的发展,手术机器人在心胸外科应用已逐步成熟,但其技术要求高,实施难度大,目前在国际上仅有为数不多的心胸外科中心能够常规开展。国内解放军总医院高长青等率先于 2007 年起应用 da Vinci 手术机器人治疗各种心胸外科疾病,至 2009 年已完成 21 种共 210 余例手术<sup>[14]</sup>,在该领域处于国际领先水平。

2.2 泌尿外科 腹腔镜技术被越来越广泛地应用于泌尿外科手术,这一微创的手术方式适用于许多常规的泌尿外科手术,如肾切除、肾上腺切除、输尿管切开、膀胱肿瘤切除、前列腺肿瘤切除等。但由于泌尿系统解剖学上的特殊性,限制了腹腔镜技术的普及和推广,一些复杂的手术往往难以掌握,而且手术并发症发生率较高。手术机器人以其独特的深部操作和精细操作的技术优势,在国外广泛应用于各种泌尿外科手术<sup>[15-16]</sup>,包括前列腺癌根治、肾切除、肾盂成形、全膀胱切除、输精管吻合、输尿管成形、活体供肾切取等。其中,前列腺癌根治术是最能体现其技术优势的手术,手术机器人提供宽阔视野和准确、灵活的控制能力,能够清楚呈现组织、器官的解剖构造和神经血管束的走行,精细的分离有利于淋巴结的清扫,准确的缝合保证了吻合的高质量,手术

中精确保留前列腺侧筋膜,有利于减少手术对患者性生活的影响,术后病理检查和随访都显示了良好的肿瘤切除效果<sup>[17]</sup>。自 2000 年开展首例手术机器人前列腺癌根治性切除以来,该术式在国外得到迅速推广。目前,在北欧国家超过一半以上的前列腺癌根治手术由手术机器人完成,而在美国,这一比例更是高达 90%,已成为前列腺癌根治手术的“金标准”<sup>[18]</sup>。

2.3 妇科 以腹腔镜技术为代表的微创手术方式正逐步取代传统的开放式手术,应用于从卵巢囊肿开窗引流到全子宫切除和盆腔淋巴结清扫等各种妇科手术中。但是大部分的妇科手术需要在狭窄的盆腔内完成,手术操作的视野和空间都非常有限,这使腹腔镜器械的活动自由度受限,且操作的动作幅度不稳定,难以完成一些需要精细分离、缝合及淋巴结清扫的操作,限制了腹腔镜技术在复杂妇科手术中的应用。da Vinci 手术机器人于 2005 年被美国 FDA 批准用于妇科微创手术,此后,该技术迅速普及。临床应用结果表明手术机器人手术具有更高的精确性,更好的操控性,能在骨盆中完成精细的操作,有利于功能的重建和盆腔淋巴结清扫<sup>[19]</sup>。国外报道较多的是用于宫颈癌根治手术,该手术需要运用精确的分离技术进行韧带切断、输尿管游离、淋巴结清扫等,可以充分发挥手术机器人的技术优势,达到理想的手术效果<sup>[20,21]</sup>。对于需要进行比较复杂缝合技术的手术,如复杂的子宫肌瘤切除术,运用手术机器人灵巧的手术臂高质量地完成缝合,有助于减少术后并发症的发生。此外,报道的手术机器人

手术还有全子宫切除、输卵管再通吻合、卵巢切除和盆底重建等<sup>[22-23]</sup>。

**2.4 腹部外科** 早期手术机器人主要用于腹部外科,开展了一些比较简单的手术,但并没有表现出比腹腔镜手术更明显的优势,因而未推广应用。近年来,随着手术机器人在其他外科领域的成功开展,其在腹部外科的应用和研究又重新活跃,迅速开展了各种手术。根据其对第二代腹腔镜手术的影响程度,可将手术机器人腹部外科手术分为三类:①对常规开展的腹腔镜手术基本没有影响的机器人手术,例如机器人胆囊切除、抗反流的胃底折叠、疝修补、阑尾切除、可调节捆扎带胃减容和良性胃肠肿瘤的切除等。②可显著提高腹腔镜手术效果的机器人手术,范围比较广泛,包括机器人肝叶切除<sup>[24]</sup>、复杂胆道重建<sup>[25]</sup>、胃旁路减重<sup>[26-27]</sup>、胃癌根治<sup>[28-29]</sup>、结直肠癌根治<sup>[30-31]</sup>、胰腺部分切除和胰十二指肠切除等<sup>[32]</sup>。③目前在腹腔镜下难以完成,唯有手术机器人能精准完成的一些手术,例如内脏动脉瘤切除吻合、细口径的胆管空肠吻合、复杂的腹腔内淋巴结清扫等。国外统计资料表明手术机器人在腹部外科的应用仍不如心胸外科、泌尿外科广泛,其原因在于:①腹腔镜技术在腹部外科应用普及、技术成熟,绝大多数的腹部手术可在腹腔镜下完成。②常规的腹部手术难度不大,对手术精度的要求不是很高。③有些腹部手术涉及的范围广泛,手术机器人操作受限制。因此,合理掌握手术机器人在腹部手术的适应证显得尤为重要<sup>[33]</sup>,通常认为主要包括两个方面:①手术机器人对某些特殊部位的腹部手术比较适用,如近端胃切除术、结肠肝曲和脾曲切除术、低位直肠切除术等。②手术机器人对长时间、精细的腹部手术优势明显,如胰十二指肠切除术、复杂的肝脏和胆道手术、血管吻合术等。而对于比较简单的腹部手术,从效价比角度考虑,目前还是主张尽量在腹腔镜下完成,或作为开展手术机器人手术早期的适应性训练。

### 3 手术机器人临床应用中存在的问题

**3.1 存在缺陷** 手术机器人自身仍存在着一定的缺陷,如:触觉反馈体系的缺失;手术机器人的器械臂固定以后,其操作范围受限;整套设备的体积过于庞大,安装、调试比较复杂;系统的技术复杂,在使用过程中可能发生各种机械故障,如术中死机等;系统的学习曲线较长,医生与系统的配合需要长时间的磨合;手术前的准备及手术中更换器械等操作耗时较长等。

**3.2 费用昂贵** 手术机器人的使用成本昂贵,表现在几个方面:①购置费用高,目前国内第三代四臂 da Vinci 手术机器人的总体购置费用在 2000 万以上。②手术成本高,机器人手术中专用的操作器械每用 10 次就需强制性更换,而更换一个操作器械需花费约 2000 美元。③维修费用高,手术机器人需定期进行预防性维修,每年维修保养费用也是一笔不小的开支。造成机器人手术使用成本高的原因通常被认为是其生产商通过收购竞争对手和专利保护等手段在这一领域形成了垄断所致,而这也成为制约手术机器人进一步发展的一个重要原因。

### 4 前景展望

从目前的应用结果分析,手术机器人突破了腹腔镜技术发展的一些限制,提高了手术的精度和可行性,使腹腔镜技术得到更高的传承。今后可能通过设备的改进、技术的完善进一步成为微创外科的新标准:①手术机器人自身的不断完善,将向小型化、智能化和实用性方向发展,使其具备与其他影像学资料更强的兼容性,并开发具有触觉反馈功能的操作系统和适配的操作器械<sup>[34]</sup>。②不断开发新的产品,并降低使用的成本<sup>[35]</sup>。在国外该领域已形成垄断的形势下,国内北京航空航天大学与海军总医院联合研发的 CRAS 手术机器人显得弥足珍贵,目前 CRAS 已完成第五代的研制和临床应用,但在扩大适用范围和实用性方面还有许多问题需要解决。积极开发国产的整套手术机器人系统、研发适配的手术器械,可能是在我国降低手术机器人使用成本的重要途径。③远程会诊、教学和手术的开展,虽早在 2001 年,第一例通过手术机器人完成的跨大西洋远程手术已经完成,但由于手术信号传导过程中的时间延迟等问题还没有满意的解决方案,使这一极具发展前景的技术至今未能推广应用。但我们仍然有理由相信,随着技术的不断进步与发展,可能通过某种特殊的方式,将全球的 da Vinci 手术机器人联系起来,形成一个局域网系统,先在系统内实现远程会诊、手术教学,再逐步向手术机器人远程手术过渡。④在军事医学和急救医学方面的应用,美军一直是手术机器人研发的积极倡导者和推动者,历经阿富汗战争、伊拉克战争的考验,美军充分意识到了手术机器人潜在的军事价值,近年来明显加快了在该领域的研究步伐,重点是高分辨率数字信号的传输技术、便携式手术机器人系统(Trauma Pod)等。据报道已完成部分试验工作,有些成果即将投入实际应用,这可能对平时、战时伤员的救治将产生深远

的影响。

# 参考文献

- [1] Wilson EB. The evolution of robotic general surgery [J]. Scand J Surg, 2009, 98(2):125-134.
- [2] Palep JH. Robotic assisted minimally invasive surgery [J]. J Minim Access Surg, 2009, 5(1):1-8.
- [3] Rodriguez E, Chitwood WR. Robotics in cardiac surgery [J]. Scand J Surg, 2009, 98(2):120-124.
- [4] Lee EK, Baack J, Duchene DA. Survey of practicing urologists: robotic versus open radical prostatectomy [J]. Can J Urol, 2010, 17(2):5094-5112.
- [5] Cho JE, Nezhat FR. Robotics and gynecologic oncology: review of the literature [J]. J Minim Invasive Gynecol, 2009, 16(6):669-681.
- [6] Roukos DH. The era of robotic surgery for colorectal cancer [J]. Ann Surg Oncol, 2010, 17(1):338-347.
- [7] Jones A, Sethia K. Robotic surgery [J]. Ann R Coll Surg Engl, 2010, 92(1):5-13.
- [8] Jung YW, Kim SW, Kim YT, et al. Recent advances of robotic surgery and single port laparoscopy in gynecologic oncology [J]. J Gynecol Oncol, 2009, 20(3):137-144.
- [9] Panos A, Myers PO, Kalangos A. Thoracoscopic and robotic tricuspid valve annuloplasty with a biodegradable ring: an initial experience [J]. J Heart Valve Dis, 2010, 19(2):201-206.
- [10] Rodriguez E, Nifong LW, Chu MW, et al. Robotic mitral valve repair for anterior leaflet and bileaflet prolapse [J]. Ann Thorac Surg, 2008, 85(2):438-444.
- [11] Kim DJ, Hyung WJ, Lee CY, et al. Thoracoscopic esophagectomy for esophageal cancer: feasibility and safety of robotic assistance in the prone position [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2010, 139(1):53-59.
- [12] Bonaros N, Schachner T, Wiedemann D, et al. Quality of life improvement after robotically assisted coronary artery bypass grafting [J]. Cardiology, 2009, 114(1):59-66.
- [13] Kappert U, Tugtekin SM, Cichon R, et al. Robotic totally endoscopic coronary artery bypass: a word of caution implicated by a five-year follow-up [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2008, 135(4):857-862.
- [14] 高长青, 杨明, 王刚, 等. 全机器人不开胸房间隔缺损修补术 [J]. 中华胸心血管外科杂志, 2007, 23(5):298-300.
- [15] Singh I. Robot-assisted laparoscopic partial nephrectomy: Current review of the technique and literature [J]. J Minim Access Surg, 2009, 5(4):87-92.
- [16] Patil NN, Mottrie A, Sundaram B, et al. Robotic-assisted laparoscopic ureteral reimplantation with psoas hitch: a multi-institutional, multinational evaluation [J]. Urology, 2008, 72(1):47-50.
- [17] Malcolm JB, Fabrizio MD, Barone BB, et al. Quality of life after open or robotic prostatectomy, cryoablation or brachytherapy for localized prostate cancer [J]. J Urol, 2010, 183(5):1822-1828.
- [18] Box GN, Ahlering TE. Robotic radical prostatectomy: long-term outcomes [J]. Curr Opin Urol, 2008, 18(2):173-179.
- [19] Chen CC, Falcone T. Robotic gynecologic surgery: past, present, and future [J]. Clin Obstet Gynecol, 2009, 52(3):335-343.
- [20] Cantrell LA, Mendivil A, Gehrig PA, et al. Survival outcomes for women undergoing type III robotic radical hysterectomy for cervical cancer: a 3-year experience [J]. Gynecol Oncol, 2010, 117(2):260-265.
- [21] Magrina JF, Kho RM, Weaver AL, et al. Robotic radical hysterectomy: comparison with laparoscopy and laparotomy [J]. Gynecol Oncol, 2008, 109(1):86-91.
- [22] Smith AL, Raz S. Current status of robotic surgery for pelvic organ prolapse [J]. BJU Int, 2010, 105(4):448-450.
- [23] Holloway RW, Patel SD, Ahmad-Scandinavians. Robotic surgery in gynecology [J]. Scand J Surg, 2009, 98(2):96-109.
- [24] Giulianotti PC, Sbrana F, Bianco FM, et al. Robot-assisted laparoscopic extended right hepatectomy with biliary reconstruction [J]. J Laparoendosc Adv Surg Tech A, 2010, 20(2):159-163.
- [25] 周宁新. “达·芬奇”机器人系统肝胆胰手术 52 例 [J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2009, 3(10):83.
- [26] Mohr CJ, Nadzam GS, Alami RS, et al. Totally robotic Laparoscopic roux-en-Y Gastric bypass: results from 75 patients [J]. Obes Surg, 2006, 16(6):690-696.
- [27] Snyder BE, Wilson T, Leong BY, et al. Robotic-assisted Roux-en-Y Gastric bypass: minimizing morbidity and mortality [J]. Obes Surg, 2010, 20(3):265-270.
- [28] Kim MC, Heo GU, Jung GJ. Robotic gastrectomy for gastric cancer: surgical techniques and clinical merits [J]. Surg Endosc, 2010, 24(3):610-615.
- [29] Glantzounis G, Ziogas D, Baltogiannis G, et al. Open versus laparoscopic robotic gastrectomy for cancer: need for comparative-effectiveness quality [J]. Surg Endosc, 2010, 24(6):1510-1512.
- [30] Baek JH, McKenzie S, Garcia-Aguilar J, et al. Oncologic outcomes of robotic-assisted total mesorectal excision for the treatment of rectal cancer [J]. Ann Surg, 2010, 251(5):882-888.
- [31] Patrii A, Ceccarelli G, Bartoli A, et al. Short- and medium-term outcome of robot-assisted and traditional laparoscopic rectal resection [J]. JSLS, 2009, 13(2):176-183.
- [32] Narula VK, Mikami DJ, Melvin WS. Robotic and laparoscopic pancreaticoduodenectomy: a hybrid approach [J]. Pancreas, 2010, 39(2):160-164.
- [33] Balli C, Ziogas D, Roukos DH, et al. Laparoscopic and robotic rectal cancer resection: expectations for improving oncological outcomes [J]. Ann Surg, 2010, 251(1):185-186.
- [34] Herrell SD, Kwartowitz DM, Milhoua PM, et al. Toward image guided robotic surgery: system validation [J]. J Urol, 2009, 181(2):783-792.
- [35] Patel HR, Linares A, Joseph JV. Robotic and laparoscopic surgery: cost and training [J]. Surg Oncol, 2009, 18(3):242-248.

(收稿日期:2010-06-23)

(本文编辑:黄攸生)