

术中影像引导在腹腔镜和机器人肝切除术中的应用

王晓颖 朱小东

【提要】 腹腔镜及机器人肝切除术已被证实是安全可行的。该法具有创伤小、恢复快等优点,但也存在缺少人手触觉感知、内窥镜视野及视角受限等缺陷。近年来随着术中超声、CT 或 MRI 影像导航、吲哚菁绿荧光融合影像引导、虚拟现实、增强现实等技术的应用,外科医生可以将复杂的肝脏解剖结构可视化、三维化,并在术中精确定位肿瘤、设计手术方案、监控并及时修正肝实质离断平面、进行精准肝切除术。术中影像引导可以避免损伤重要管道结构,减少出血,增加了手术的安全性。其在腹腔镜及机器人肝切除术中的应用不仅在一定程度上弥补了触觉和视野的缺陷,而且突破了人类视觉或触觉的极限。本文系统介绍了各种术中影像引导技术在腹腔镜及机器人肝切除术中的应用。

【关键词】 影像导航外科; 腹腔镜手术; 机器人手术; 肝切除术

Intraoperative image-guided laparoscopic and robotic hepatectomies Wang Xiaoying, Zhu Xiaodong. Department of Liver Surgery, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

Corresponding author: Wang Xiaoying, Email: xiaoyingwang@fudan.edu.cn

【Abstract】 Laparoscopic and robotic hepatectomies have proved to be safe and feasible with advantages of minimally invasive and enhanced recovery, despite the inherent defects of restricted endoscopic angle of vision and having no tactile sensing. In recent years, the development of intraoperative image-guided techniques, such as real-time intraoperative ultrasonography, intraoperative CT/MRI-guided navigation system, fusion ICG fluorescence imaging, and augmented reality, have greatly assisted surgeons with precise targeting of the tumors, preoperative surgical planning, along with supervision and in-time revision of the amputation plane of hepatic parenchyma. Therefore, it has enabled precise hepatectomy without damaging important vascular structures, reduced intraoperative blood loss, and increased the safety of surgical procedures. Besides, intraoperative image guide could compensate the defect of restricted vision in laparoscopic and robotic hepatectomies, pushing the limits of human vision field. This article will describes the application of image-guided techniques in laparoscopic and robotic hepatectomies.

【Key words】 Image-guided surgery; Laparoscopic surgery; Robotic surgery; Hepatectomy

腹腔镜及机器人肝切除术已被证实是安全可行的。该法具有创伤小、恢复快等优点,近年来迅猛发展。但腹腔镜及机器人手术本身亦存在一定缺陷:(1)使用长器械实现手的延长,但缺少了触觉感知;(2)使用内窥镜替代人眼虽然获得放大的图像,但视角改变且镜头视野受限,无法全面观察肝脏及其与邻近脏器的解剖关系。此外,同裸眼一样,内窥镜无法透视肝脏内部结构。近年来随着术中超声、基于 CT 或 MRI 图像的术中导航、吲哚菁绿荧光融合影像引导、虚拟现实、增强现实等技术的应用,外科医生可以将复杂的肝脏解剖结构可视化、三维化,并在术中精确定位肿瘤、设计手术方案、监控并及时修正肝实质离断平面、进行精准肝切除术。术中影像引导可以避免损伤重要管道结构,减少出血,增加了手术的安全性。其在腹腔镜及机器人肝切除术中不仅在一定程度上替代“触摸”和“透视”的作用,而且拓展了人类视觉或触觉的极限。本文系统介绍了各种术中影像引导技术在腹腔镜及机器人肝切除术中的应用。

一、超声引导

腹腔镜超声(LUS)可以实时“透视”肝脏内部结构,具有使用灵活、操作方便、无辐射、价廉等优点。LUS 高频探头可以直接置于肝脏表面进行扫描,避免了腹壁组织和肠内气体的干扰,能获得较术前常规二维超声更清晰的图像。LUS 还可以通过彩色超声多普勒、超声造影、实时组织弹性成像(real-time tissue elastography)等技术明确肿瘤的位置、大小、数目、性质、范围,并给出具体测量数据。因此,对于术前影像学不能发现的小病灶或转移灶,LUS 具有很高的检出率。Milsom 等^[1]的前瞻性研究对比了 77 例结直肠癌肝转移患者 LUS 与增强 CT 对肝转移灶的检出率,结果表明 LUS 的检出率更高。

LUS 的彩色多普勒模式可以准确分辨肝内胆管、门静脉、肝静脉、下腔静脉及其属支等结构,更好地显示肿瘤与血管及胆管的三维毗邻关系。此外,

LUS 还可发现由于肿瘤侵犯血管、胆管等造成的管腔狭窄、扩张、癌栓以及血流动力学改变。因此,术中 LUS 可以提高肝癌及胆道肿瘤分期、可切除性评估的准确性^[2-3]。LUS 能准确显示肝内胆管的解剖细节,确定肝内胆管结石位置、范围及扩张胆管所在肝段(叶),指导胆道结石的手术,减少结石的遗漏。

在腹腔镜或机器人肝切除术中,利用 LUS 在肝脏表面勾画出肿瘤边界和周边的脉管结构,可以确定最佳切除范围。尤其是在腹腔镜解剖性肝段切除时,利用 LUS 可以在肝脏表面标记肝静脉走行,确定预切除肝段的相应肝蒂。Sakoda 等^[4]报道利用术中 LUS 引导选择性门静脉注射吲哚菁绿荧光染色,可以精准划定目标肝段的解剖范围。文献报道,在腹腔镜肝脏外科手术,LUS 的使用改变了 16% ~ 25% 的术前规划^[5-6]。

由于肝实质离断面夹着气泡及血凝块,在 LUS 下显示为强弱不等的高回声条带影像,因此术中超声可以实时跟踪肝脏离断平面,引导并修正离断平面,从而获得足够的切缘并避免损伤拟保留的重要管道结构^[7]。

此外,肝实质离断后还可利用 LUS 验证切除标本中是否含有完整肿瘤;对余肝进行扫查,则可明确是否有残留肿瘤以及余肝肝血流流出道是否正常。肝内胆管结石行肝叶切除后,再次使用 LUS 检查残余肝脏,有助于发现肝内残留结石,结合胆道镜取石,可显著提高结石清除率。

二、CT 或 MRI 影像引导

Yamanaka 等^[8]报道利用术前肝脏 CT 的影像数据进行三维重建,可显示肿瘤、门静脉、肝静脉系统的空间关系,设定门脉的横断水平;利用虚拟手术软件,则可计算其灌注范围,预测切除肝脏体积及肿瘤切缘。术中可根据术前模拟切面精确离断肝脏实质。Kingham 等^[9]通过 Explorer™ 软件将术前 CT 或 MRI 影像三维重建,术中实时跟踪腹腔镜器械位置,将腹腔镜器械位置与 3D 模型叠加,引导切除。Huber 等^[10]报道:对化疗后“消失”无法用超声识别的结肠癌肝转移病灶,术中使用计算机辅助 3D 导航,可在腹腔镜下成功实施肿瘤切除。Monden 等^[11]报道在 CT 定位下将带钩的不锈钢丝穿刺置于肿瘤附近,腹腔镜肝切除术中以此为定位标志,可对无法用超声探及的病灶进行切除。

由于 MRI 具有较高的软组织对比度,对肿瘤及硬化结节的识别优于超声及 CT。Chopra 等^[12]研发了与 MRI 兼容的内镜系统,包括非铁磁性的镜头及

手术器械。在动物实验中利用开放 MRI 获得实时图像,引导腹腔镜肝切除。

三、吲哚菁绿荧光融合影像引导

吲哚菁绿(indocyanine green fluorescence, ICG)是一种近红外荧光染料,主要通过肝细胞代谢并通过胆道排泄。肝脏肿瘤由于胆管结构异常或周围肝脏组织受压,胆汁排泄异常,常出现 ICG 淤滞。ICG 荧光显像可以帮助识别肝脏原发或继发性肿瘤^[13],甚至可以发现一些术前影像学 and 术中超声不能发现的病灶^[14-15]。然而,ICG 荧光显像定位肿瘤也存在局限:(1)近红外线的组织穿透力较低。虽然大多数肝包膜下表浅部位的肿瘤可以显示^[14],但对于处于肝脏深部(距离肝包膜 > 8 mm)的肿瘤,显像存在困难。对于深部的肿瘤,ICG 荧光显像仍然可以在肝脏离断的过程中实时帮助确定肿瘤切缘。(2) ICG 荧光显像对有肝硬化结节假阳性率过高。

ICG 胆道显像可以帮助识别肝内外胆管的解剖结构。通过术前静脉注射 ICG 或术中胆囊内注射 ICG 的方法来显示胆道。在开展围肝门区肿瘤切除或胆道手术时,ICG 的胆道显像可以避免误伤胆道^[16]。ICG 胆道显像还可以帮助术中识别肝断面上的微小胆漏,降低术后胆漏的发生率。

ICG 荧光融合影像引导对解剖性肝段或亚肝段切除具有重要价值。肝段染色有两种策略:(1)在术中超声的引导下,穿刺目标肝段的门静脉分支并注射 ICG,对拟切除肝段进行染色(正染);(2)分离并阻断拟切除肝段的门静脉及肝动脉分支,从外周静脉内注射 ICG,拟保留的肝脏获得染色,而拟切除肝段则无染色(负染)^[17]。ICG 注入后,在肝脏表面及深部实质内均可获得清晰持久的荧光染色,解决了美蓝染色持续时间短、需要阻断肝动脉的不足^[4]。

在腹腔镜供肝切取手术中,ICG 显像可以指导肝脏的分割和胆管的离断^[18]。以切取右半肝为例,术中临时夹闭肝右动脉和门静脉右支后,外周静脉内注射 ICG 进行左半肝染色,ICG 显像可以在肝脏表面和肝实质内清晰显示的左右半肝的分界线,从而实时引导肝脏的离断。在 ICG 染色之后,即可解除对右半肝的血流阻断,不需要频繁夹闭右半肝血流确定肝脏的分界线,从而减少了右半肝的缺血-再灌注损伤。当肝实质离断到肝门板时,部分 ICG 排泄至胆管内,胆道显像。此时向胆囊内注射 ICG,亦可实现胆道显像^[19]。ICG 胆道显像可以准确显示左右侧肝管分叉处,从而确定最佳的胆管离断点。

四、虚拟现实技术

虚拟现实技术(virtual reality, VR)利用计算机仿真系统根据影像检测数据生成一个虚拟、逼真的患者肝脏解剖 3D 模型,利用 VR 眼镜能够使医生完全沉浸在一个虚拟的、交互式的 3D 立体环境中。在手术准备阶段或术中可以帮助术者虚拟进入肝脏内部探索,有助于理解肝内管道解剖细节及与肿瘤的三维关系,并借助虚拟的腹腔镜器械,进行模拟手术,确定最佳手术方案^[20-21]。

五、增强现实技术

增强现实技术(augmented reality, AR)可将虚拟 3D 模型与术中实时解剖位置匹配,与术中现实图像融合。Feuerstein 等^[22]将校准点贴于患者皮肤上,CT 扫描后构建虚拟 3D 模型,与校准点配准,然后将光学跟踪的内窥镜在校准点间移动,模拟腹腔镜镜头及器械插入体内的情景及视野范围,选择最佳 Trocar 摆放位置。与传统单纯依靠经验放置 Trocar 不同,这一方法可以针对不同的肝肿瘤患者设计个体化的 Trocar 放置方案,使腹腔镜视野及器械活动范围最大化。

Volonte 等^[23]利用 Osirix 软件将术前 CT 影像数据生成 3D 图像,利用投影仪投射到患者腹部的皮肤上,并进行配准。该法可直观地展示病变部位及重要相邻器官的毗邻关系,实现内部结构的可视化,辅助外科医生进行腹腔镜手术肝脏切除等手术。

Kleemann 等^[24]开发了适用于腹腔镜肝切除术的术中导航系统(LapAssistent)。利用术前的 CT 或 MRI 影像,进行 3D 重建,术中使用电磁跟踪系统进行匹配,然后将术中实时超声图像、腹腔镜图像与术前虚拟 3D 模型图像融合,术中结合超声及 AR,准确定位出术前规划切面。

现阶段大多数术中 AR 导航还是利用术前的 CT 或 MRI 的图像,建立 3D 肝脏模型,与术野的解剖结构进行配准,叠加跟踪的手术器械图像,同时显示肝脏 3D 内部结构及手术器械位置。但这一方案亦存在缺陷,术中由于气腹、呼吸、心跳、术者操作(如游离、牵拉)、组织解剖等所致的肝脏变形以及肝脏位置变化,配准精度有限。为了解决这一问题,Kenngott 等^[25]在杂交手术室利用 Simens 的 Artis-Zeego™ 系统获取术中锥形束 CT(CBCT, robotic C-arm cone-beam CT)图像数据,结合 Simens 的 AR 导航系统(SyngoiPilot®),将术中实时 CT 图像叠加在显示屏上,显示重要结构、管道及切面。由于连续更新术中 CT 图像,克服了肝脏变形所致的精度下降。

SyngoiPilot® AR 在实际腹腔镜使用中的误差约为(0.96±0.52)mm。这样的误差区间可以满足腹腔镜肝脏切除的需要。

机器人手术系统在术者及患者间增加了计算机界面,为虚拟增强技术创造了很好平台。Buchs 等^[26]将 3D 导航系统(CAS-One)与 Da Vinci 机器人手术系统结合,将 3D 重建的肝脏图像、光学跟踪的器械、实时内镜视频图像叠加,直接显示在机器人操控平台目镜上。将目标肿瘤、肝脏门静脉、肝静脉的主要分支及胆管的主要分支可视化,实时评估手术器械尖端与肿瘤及重要管道的距离及关系,判断是否能获得安全的切缘。机器人手术与腹腔镜手术相比,可以滤过颤动,图像和器械操作都更加稳定,在术中导航、实时定位方面均具有更高的稳定性和更好的效果。

六、总结及展望

术中影像引导技术在腹腔镜及机器人肝切除术中不仅在一定程度上弥补了触觉和视野的缺陷,而且突破了人类视觉或触觉的极限,在提高手术精度、减少手术并发症方面具有重要作用。随着数字医学、人工智能技术的进步,越来越多的术中影像引导技术及模式将缤纷呈现,尤其是人工智能辅助的 AR 导航技术在术中的应用将更加广泛。由于机器人手术系统在术者及患者间增加了计算机界面,为术中影像导航技术创造了很好的平台面,更多实时、高匹配精度、多模式联合导航系统将来亦会用于机器人肝切除术。

参 考 文 献

- [1] Milsom JW, Jerby BL, Kessler H, et al. Prospective, blinded comparison of laparoscopic ultrasonography vs. contrast-enhanced computerized tomography for liver assessment in patients undergoing colorectal carcinoma surgery[J]. Dis Colon Rectum, 2000, 43(1): 44-49.
- [2] Viganò L, Ferrero A, Amisano M, et al. Comparison of laparoscopic and open intraoperative ultrasonography for staging liver tumours[J]. Br J Surg, 2013, 100(4): 535-542. DOI: 10.1002/bjs.9025.
- [3] Russolillo N, DElletto M, Langella S, et al. Role of laparoscopic ultrasound during diagnostic laparoscopy for proximal biliary cancers: a single series of 100 patients[J]. Surg Endosc, 2016, 30(3): 1212-1218. DOI: 10.1007/s00464-015-4333-4.
- [4] Sakoda M, Ueno S, Iino S, et al. Anatomical laparoscopic hepatectomy for hepatocellular carcinoma using indocyanine green fluorescence imaging[J]. J Laparoendosc Adv Surg Tech A, 2014, 24(12): 878-882. DOI: 10.1089/lap.2014.0243.
- [5] Lai EC, Tang CN, Ha JP, et al. The evolving influence of laparoscopy and laparoscopic ultrasonography on patients with hepatocellular carcinoma[J]. Am J Surg, 2008, 196(5): 736-740. DOI: 10.1016/j.amsurg.2007.08.073.
- [6] Soliman HO, Gad ZS, Mahmoud AM, et al. Laparoscopy with

- laparoscopic ultrasound for pretreatment staging of hepatic focal lesions: a prospective study[J]. *J Egypt Natl Canc Inst*, 2011, 23(4): 141-145. DOI: 10.1016/j.jnci.2011.10.004.
- [7] Araki K, Conrad C, Ogiso S, et al. Intraoperative ultrasonography of laparoscopic hepatectomy: key technique for safe liver transection[J]. *J Am Coll Surg*, 2014, 218(2): e37-41. DOI: 10.1016/j.jamcollsurg.2013.10.022.
- [8] Yamanaka J, Okada T, Saito S, et al. Minimally invasive laparoscopic liver resection; 3D MDCT simulation for preoperative planning[J]. *J Hepatobiliary Pancreat Surg*, 2009, 16(6): 808-815. DOI: 10.1007/s00534-009-0112-8.
- [9] Kingham TP, Jayaraman S, Clements LW, et al. Evolution of image-guided liver surgery: transition from open to laparoscopic procedures[J]. *J Gastrointest Surg*, 2013, 17(7): 1274-1282. DOI: 10.1007/s11605-013-2214-5.
- [10] Huber T, Baumgart J, Peterhans M, et al. Computer-assisted 3D-navigated laparoscopic resection of a vanished colorectal liver metastasis after chemotherapy[J]. *Z Gastroenterol*, 2016, 54(1): 40-43. DOI: 10.1055/s-0041-107542.
- [11] Monden K, Sadamori H, Hioki M, et al. Usefulness of a CT-guided hookwire marking in laparoscopic partial hepatectomy for hepatocellular carcinoma invisible on ultrasonography[J]. *Asian J Endosc Surg*, 2017, 10(1): 100-103. DOI: 10.1111/ases.12321.
- [12] Chopra SS, Schmidt SC, Eisele R, et al. Initial results of MR-guided liver resection in a high-field open MRI[J]. *Surg Endosc*, 2010, 24(10): 2506-2512. DOI: 10.1007/s00464-010-0994-1.
- [13] Ishizawa T, Fukushima N, Shibahara J, et al. Real-time identification of liver cancers by using indocyanine green fluorescent imaging[J]. *Cancer*, 2009, 115(11): 2491-2504. DOI: 10.1002/cncr.24291 DOI: 10.1002/jso.24363.
- [14] Kudo H, Ishizawa T, Tani K, et al. Visualization of subcapsular hepatic malignancy by indocyanine-green fluorescence imaging during laparoscopic hepatectomy[J]. *Surg Endosc*, 2014, 28(8): 2504-2508. DOI: 10.1007/s00464-014-3468-z.
- [15] Takahashi H, Zaidi N, Berber E. An initial report on the intraoperative use of indocyanine green fluorescence imaging in the surgical management of liver tumors[J]. *J Surg Oncol*, 2016, 114(5): 625-629. DOI: 10.1002/jso.24363.
- [16] Aoki T, Murakami M, Yasuda D, et al. Intraoperative fluorescent imaging using indocyanine green for liver mapping and cholangiography[J]. *J Hepatobiliary Pancreat Sci*, 2010, 17(5): 590-594. DOI: 10.1007/s00534-009-0197-0.
- [17] Ishizawa T, Zuker NB, Kokudo N, et al. Positive and negative staining of hepatic segments by use of fluorescent imaging techniques during laparoscopic hepatectomy[J]. *Arch Surg*, 2012, 147(4): 393-394. DOI: 10.1001/archsurg.2012.59.
- [18] Suh KS, Hong SK, Lee KW et al. Pure laparoscopic living donor hepatectomy: Focus on 55 donors undergoing right hepatectomy [J]. *Am J Transplant*, 2017, Aug 8 [Epub ahead of print]. DOI: 10.1111/ajt.14455.
- [19] Tomassini F, Scarinci A, Elsheik Y, et al. Indocyanine green near-infrared fluorescence in pure laparoscopic living donor hepatectomy: a reliable road map for intra-hepatic ducts? [J]. *Acta Chir Belg*, 2015, Jan-Feb 115: 2-7.
- [20] Marescaux J, Clement JM, Tassetti V, et al. Virtual reality applied to hepatic surgery simulation: the next revolution[J]. *Ann Surg*, 1998, 228(5): 627-634.
- [21] Pessaux P, Diana M, Soler L, et al. Towards cybernetic surgery: robotic and augmented reality-assisted liver segmentectomy[J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2015, 400(3): 381-385. DOI: 10.1007/s00423-014-1256-9.
- [22] Feuerstein M, Mussack T, Heining SM, et al. Intraoperative laparoscope augmentation for port placement and resection planning in minimally invasive liver resection[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2008, 27(3): 355-369. DOI: 10.1109/TMI.2007.907327.
- [23] Volonte F, Pugin F, Bucher P, et al. Augmented reality and image overlay navigation with OsiriX in laparoscopic and robotic surgery: not only a matter of fashion[J]. *J Hepatobiliary Pancreat Sci*, 2011, 18(4): 506-509. DOI: 10.1007/s00534-011-0385-6.
- [24] Kleemann M, Deichmann S, Esnaashari H, et al. Laparoscopic navigated liver resection: technical aspects and clinical practice in benign liver tumors[J]. *Case Rep Surg*, 2012, 2012: 265918. DOI: 10.1155/2012/265918.
- [25] Kenngott HG, Wagner M, Gondan M, et al. Real-time image guidance in laparoscopic liver surgery: first clinical experience with a guidance system based on intraoperative CT imaging[J]. *Surg Endosc*, 2014, 28(3): 933-940. DOI: 10.1007/s00464-013-3249-0.
- [26] Buchs NC, Volonte F, Pugin F, et al. Augmented environments for the targeting of hepatic lesions during image-guided robotic liver surgery[J]. *J Surg Res*, 2013, 184(2): 825-831. DOI: 10.1016/j.jss.2013.04.032.

(收稿日期:2017-10-19)