

机器人在小儿外科手术中的应用及争议



杨 振¹ 黄格元^{1,2}

机器人手术系统的历史追溯到 20 世纪 90 年代。1994 年美国 Computer Motion 公司研制了第 1 台协助微创手术的内窥镜自动定位系统,取名伊索(Aesop),此后又生产出宙斯(Zeus)机器人手术系统,于 2000 年获得美国 FDA 市场认证后应用于临床。同样来自美国的 Intuitive Surgical 公司通过研究远程操控技术(Master-Slave Telemanipulator),使得机器人手术系统的研究迈出了决定性的一步。2000 年 Intuitive Surgical 公司制造的达芬奇(da Vinci)机器人手术系统通过了美国 FDA 市场认证后正式在手术室使用^[1]。2003 年美国 Intuitive Surgical 公司收购了 Computer Motion 公司。目前市场上用于腹腔镜手术的机器人手术系统只有达芬奇手术机器人系统。

一、应用概述

达芬奇机器人手术系统由医生控制台、床旁操作臂和视频系统三部分组成。手术医生坐在控制台前,通过使用控制手柄来操控手术器械和立体腔镜;工作机械手臂可以完成手术操作。达芬奇机器人的 3D 高清影像系统,与腹腔镜相比,手术系统图像更清晰,为术者提供真实的术野,3D 手术视野,且放大 10 ~ 15 倍,利于术中辨认组织关系,可准确进行组织定位^[2]。机器人手术操作更精细,其手术器械仿真手腕可沿垂直轴 360°和水平轴 270°旋转,可提供 7 个自由度的活动,包括进退、手腕旋转、上下左右方向弯曲、末端的抓握动作^[3]。具有手腕式灵活性的机械臂拓展了器械在有限术野及固定角度下的活动空间,可以延伸到传统器械不能到达的区域。同时机械臂能识别和过滤手部的颤抖信号,提高了手术的精确性及安全性。

近年来,机器人手术应用的范围和数量迅速扩大增长。迄今全世界已装备了超过 3 000 台达芬奇机器人,主要集中在欧美国家。在中国,目前仅有 46 台达芬奇机器人外科手术系统投入临床使用,其

中香港地区 9 台。2007 年至 2013 年,美国达芬奇系统手术数量迅速增长,年手术量增加 5 倍以上,达 425 000 例,总共手术数量超过 200 万例^[1]。

二、在小儿外科的应用

近年来机器人系统凭借其在重建类手术中的独特优势,得以在小儿外科领域顺利开展。机器人手术已应用于许多小儿胃肠、泌尿、胸科手术^[4-8];肾盂二次成形术^[9]、输尿管吻合术^[10]、膀胱输尿管反流^[3]、胆道闭锁 Kasai 手术^[4]、复杂肝胆异常^[11]、胆总管的囊肿切除^[12-14]、纵膈肿瘤^[15,16]、肺叶切除^[17]等均有报道。胃底折叠术和肾盂成形术是目前常用的两种术式^[4]。这些术式占儿童机器人手术总量的 46%^[4]。2000 年 7 月第 1 次报道机器人胃底折叠术 2 例^[18,19];2002 年 Gettman 报道第 1 例机器人肾盂成形术(RP 手术)^[20]。

最近的荟萃分析结果显示两个术式优势相当或略优于替代技术^[21,22]。2014 年 Thomas P. Cundy^[21]完成荟萃分析确定机器人和传统腹腔镜胃底折叠术短期临床结果之间没有显著差异。分析内容包括:手术中转率、住院时间、术后并发症和总手术操作时间,同时也表明机器人手术费用更高,术后镇痛要求与常规腹腔镜手术相当或低于常规腹腔镜手术。

肾盂成形术开放手术是治疗肾盂输尿管梗阻的金标准,达 97% 的成功率^[23,24]。机器人腹腔镜肾盂成形术已被证明是同样有效的治疗方法,成功率 90% ~ 95%^[7,25,26]。随着手术经验和仪器的发展,机器人肾盂成形术可以顺利完成,且有较高的成功率^[27,28]。

Subotic 等^[29]研究提示:4 岁以下儿童接受腹腔镜肾盂成形术 20 例,而同样 4 岁以下儿童接受机器人手术 19 例,二者手术时间比较有统计学差异,成功率均为 100%。Riachy 等^[30]回顾了 18 例(平均年龄 8.1 岁)腹腔镜肾盂成形术和 46 例(平均年龄 8.8 岁)机器人手术病例,发现两种方法治疗 UPJO 均有效,临床结果相似,但机器人手术操作时间更短(平均时间分别为 209 min 和 298 min, $P = 0.008$)。

香港大学玛丽医院于 2013 年回顾性分析了本

院实施的达芬奇手术 20 例,其中 9 例胃底折叠术,5 例肾盂成形术,2 例胆总管囊肿切除术,2 例部分食管切除术,1 例输尿管膀胱再植术和 1 例可控性尿道改道术^[31]。其中 1 例胆总管囊肿中转开腹手术,1 例食管狭窄行部分食管切除术经二次手术治愈。胃底折叠术的平均手术时间为 201 min,肾盂成形术的平均手术时间为 204 min。至目前为止,共完成机器人手术超过 50 例。我们认为机器人手术系统用于小儿外科是可行的。但由于器械和设备的限制,需要正确把握手术适应证,提高手术技巧,积累经验,才能提高临床疗效。

另外,笔者认为机器人手术在成人外科中应用广泛,达到微创效果,有伤口美观、瘢痕小的优点,但对于小儿外科这一点并不是优势。成人腹腔镜镜头直径是 10 mm,器械直径是 5 mm,机器人镜头直径是 12 mm 或 8 mm,器械直径是 8 mm 或 5 mm。而小儿外科腹腔镜镜头直径 5 mm,器械直径 3 mm,就伤口大小而言,机器人手术不能成为小儿外科微创手术的标志。

三、学习曲线

传统腹腔镜技术由于其操作难度高,学习曲线陡峭,一定程度上限制了其在重建类手术中的应用。与传统腹腔镜手术相比,达芬奇机器人更易于操作,可明显降低手术难度,缩短学习曲线。

机器人手术是陡峭的学习曲线,外科医生大致需要经过 37 名患者来克服学习曲线^[32]。Sukumar^[33]研究显示,完成微创手术的手术数量与更好的结果和更少的并发症相关。Lucian Panait^[34]的研究表明,腹腔镜操作技术训练不够娴熟,反而给复杂的机器人操作提供了明显的好处。新手对于复杂的技术、比如腔内缝合,在机器人手术系统上完成有显著的提高^[35]。相反,腹腔镜技术熟练的参与者在完成简单操作时,机器人系统的表现较传统腹腔镜操作差。但有经验的腹腔镜手术者,可以经过更短的适应过程而完成机器人手术的学习曲线。最后,学习者可以通过动物模型手术和规范的技术培训项目来帮助完成机器人手术的学习曲线。

四、优势与劣势

(一) 操作过程中的问题—触觉反馈、机械臂的安装及调整

机器人手术操作系统,手术医生坐在控制台前,通过使用控制手柄来操控手术器械和立体腔镜,工作机械手臂可以完成手术操作。与传统腹腔镜手术相比,机器人手术完全缺乏触觉反馈,术中会出现

因操作力度过大而导致缝线断裂的现象。但许多外科医生觉得增强视觉辨认、增加视觉反馈可弥补^[5]。Hagen 等^[36]发现腹腔镜经验丰富的术者在机器人平台上有很强的预测性。腹腔镜外科医生可能更有经验来克服一些困难,比如拉伸感和触觉反馈缺失、在 3D 视野下对比邻关系的判断以及完成视野之外的操作。而 Chang 等^[37]研究表明,腹腔镜外科医生需要注册这项新技术,经过足够的训练,可能会超过他们的腹腔镜技能。

机器人系统手术过程中,首先要进行机械臂的安装,这个过程消耗了一部分手术时间。在手术中也会有相应的调整,可能会反复拆卸、安装机械臂。另外,机器人的摄像系统因为机械臂的限制,不能像腹腔镜一样灵活。如果要改变观察方向,比如:从脐部放置摄像孔,从向右上腹观察改为左下腹观察,就要重新拆卸、安装机械臂。这个过程不仅耗时,而且容易出现机械性故障而影响手术。

(二) 操作空间的限制问题

机器人手术过程,机械臂的碰撞会影响手术进程,甚至无法完成而改变手术方式。因此,推荐每个套管位置距离 8 cm 以上,机器人机械臂必须放置 5.62 cm 以上的深度。不难理解,机器人手术在年龄越小的患者,套管机器臂之间冲突的风险变得越大。Yeung 等认为没有办法在小于 64 cm³ 的空间内完成机器人手术^[38]。

Finkelstein^[39]的研究表明:机器人手术患儿两髂前上棘距离 > 13 cm,剑突耻骨距离 > 15 cm,会明显减少机械臂的碰撞次数,确保手术顺利完成,降低机械故障的发生率。Finkelstein 认为这两个测量值可以作为是否适合做机器人手术的指标。

推荐的每个套管位置距离 8 cm 以上,因为给予气体后套管之间的距离会相应增长,所以达芬奇外科系统套管之间最小 5 ~ 6 cm 的距离是可以接受的^[40]。机器人机械臂必须放置 5.62 cm 以上的深度才能达到可操作性。为了“欺骗”这个长度,他建议将病人加 1.5 ~ 2.0 cm 的体外外套管针,提供了一个额外的 1.5 ~ 2.0 cm 的余量^[41]。

尽管进行各种改进,某些手术,特别是新生儿胸外科仍然具有挑战性,受到很大限制。原因是肋骨的固定位置、胸壁弹性较腹壁差,儿童体重 3.0 kg 以下肋间隙,很难插入 8 mm 套管针。

因此,在小儿外科机器人手术,特别设计和安排套管针的位置。整个设备的小型化应该减少外部结构,使机器人系统更适合低龄儿童,甚至新生儿。

（三）高额费用

机器人手术的一个明显缺点是机器人的初始购买高成本和持续的维护费用^[42]。在法国,达芬奇机器人首次购买费用 €1 466 000^[43]。计划使用 5 年,每年约 €300 000。自 2010 年以来,机器人的维护费用是每年 €120 000。2010 年总共 814 h 的机器人手术时间。机器人外科手术固定成本每小时 €516。在加利福尼亚大学欧文医学院小儿泌尿外科,机器人肾盂成形术平均费用 5 466 美元,而开放手术约 2 410 美元^[8]。

手术数量越多,可以分摊机器人系统的固定成本,才有可能实现盈利。澳大利亚 Basto 等^[44]分析机器人前列腺切除术手术成本、费用和手术数量之间的关系。他们发现在公共医疗系统医院的机器人手术数量每年至少 140 例,可以返回成本。目前,很少有儿科专科医院外科的机器人手术可以达到每年 140 例。建议可以促进多医学中心、多专科之间协作,共同使用机器人系统。这样才能增加机器人的工作时间,最大程度发挥机器人系统的效益。

机器人技术开展的初期不可避免地存在技术专利化、费用昂贵的问题,但相信随着技术的普及,手术费用会逐渐降低,进而从高端化逐渐走向平民化。所有的改进与更新都是从患者及外科医师的需求出发,从而实现患者利益的最大化。

（四）团队配合

在机器人手术过程中,由于术者所处的操作台与手术台之间存在一定距离,与助手之间可能存在一定的沟通和协调障碍,所以达芬奇机器人手术中团队合作的难度较普通手术高,故在达芬奇机器人的培训中,不仅要熟悉操作系统,更重要的是手术团队的培训。另外,在手术过程中出现紧急情况(如大出血)需要中转手术,此时需要助手也要有相应手术经验,不能耽误时间而产生不良后果。

（五）遵守循证医学原则

随着每一项新的技术革新,现代医学的根本原则是循证医学。循证医学依据可靠程度大体可分为以下五级(可靠性依次降低)。一级:质量可靠的随机对照试验后所作的系统评价或 Meta 分析。二级:单个的样本量足够的随机对照试验结果。三级:设有对照组但未用随机方法分组的研究。四级:无对照的系列病例观察,其可靠性较上述两种降低。五级:专家意见。

现在关于机器人手术的文献以案例报道、回顾性研究为主,随机对照试验占小儿外科机器人手术

文献报道的比例介于 0.05% 和 3%^[45-47]。分析比较的研究只占小儿机器人手术文献的 14%^[4]。其中,单个样本量大于 100 例的机器人手术的文献报道数量为 6 篇^[1,5,48-51]。机器人手术还需要小儿外科医生共同努力,增加机器人手术数量及拓展手术种类,需要多中心、多学科联合研究及科学实验,需要有更高质量和水平的文献证据来证明新技术的可行性、安全性及有效性。

五、前景与展望

机器人手术系统在小儿外科领域中的应用仍存在诸多不足,机器人操作器械体积较大,缺乏儿童专用的操作通道,手术操作空间较成人而言也相对较小,操作难度增加,需进一步设计与改进。

健康的市场竞争需要打破技术、专利的垄断形势,刺激推动价格下降,使患者及医师从中受益。世界各地的各种学术和行业组织至少有 20 种不同的机器人手术系统原型正在开发^[52]。应用于小儿外科的机器人平台和设备最近也被报道。接近临床使用的机器人系统是 SPORTTM(单端口孔机器人手术)手术系统,是由泰坦医疗(泰坦医疗公司,加拿大、多伦多)研发^[53]。同时,da Vinci 系统将推出自己的单孔手术系统,The da Vinci Single site System 很快可以商业应用。系统具体数据尚未公开;然而,估计端口大小直径大约是 25 mm,需要插入的长度约 75 mm 操作器械^[54]。

KidsArm 项目设在多伦多儿童医院已获得大量资金,开发单孔、图像引导机械手臂自动缝合吻合术,已经公布了这个平台的体外验证数据^[53]。华盛顿特区儿童国家医疗中心 Sheikh Zayed 研究所从事小儿外科技术创新发展,现正开展智能组织吻合机器人(STAR)的开发,这个手术机器人是为了提高小儿腹腔镜缝合的质量和效率、提高缝合一致性及准确性^[55]。硅胶模型实验数据表明,智能组织吻合机器人(STAR)在手动或自动模式缝合一致性上四倍优于 da Vinci 机器人手术和比 da Vinci 机器人手术快 5 倍,比使用传统腹腔镜仪器快 9 倍^[54]。

目前,在无法充分证明机器人有优势替代原技术之前,我们也可以寻找新的技术。其中 3D 腹腔镜机器已被接受,同样使用 3D 高清影像系统,但购买价格是机器人系统的 1/6,且没有后续高额的维护费。医生使用的器械是我们熟悉的 3 mm、5 mm 腹腔镜器械。所以,3D 腹腔镜手术系统在目前可以作为推荐的更新换代的手术系统。

我们认为,机器人技术已可以发挥其优势,在小

儿外科手术中证明其可行性,同时还具备巨大潜力。由于器械和设备的限制,我们仍要正确选择患者手术适应证,提高手术技巧,积累经验,才能提高临床疗效。手术者可以通过动物模型手术和规范的技术培训项目来帮助完成机器人手术的学习曲线。制造商应开发更适合小儿使用的机器系统,使创伤更小,费用降低。在未来,儿外科手术医师要总结更高质量和水平的证据来证明机器人技术可替代原技术,并促进更广泛的临床应用。

参考文献

- James D, Geiger, Ronald B. Hirschl, Innovation in surgical technology and techniques: Challenges and ethical issues [J]. *Seminars in Pediatric Surgery*, 2015, 24: 115–121.
- Meehan JJ, Sandler A. Pediatric robotic surgery: a single-institutional review of the first 100 consecutive cases [J]. *Surg Endosc*, 2008, 22: 177–182.
- Lendvay T. Robotic-assisted laparoscopic management of vesicoureteral reflux [J]. *Adv Urol*, 2008, 732942.
- Cundy TP, Shetty K, Clark J, et al. The first decade of robotic surgery in children [J]. *J Pediatr Surg*, 2013, 48: 858–865.
- Alqahtani A, Albassam A, Zamakhshary M, et al. Robot-assisted pediatric surgery: how far can we go? [J]. *World J Surg*, 2010, 34: 975–978.
- Casale P. Laparoscopic and robotic approach to genitourinary anomalies in children [J]. *Urol Clin North Am*, 2010, 37: 279–286.
- Lee RS, Retik AB, Borer JG, et al. Pediatric robot assisted laparoscopic dismembered pyeloplasty: comparison with a cohort of open surgery [J]. *J Urol*, 2006, 175: 683–687.
- Yee DS, Shanberg AM, Duel BP, et al. Initial comparison of robotic-assisted laparoscopic versus open pyeloplasty in children [J]. *Urology*, 2006, 67: 599–602.
- Passerotti CC, Nguyen HT, Eisner BH, et al. Laparoscopic reoperative pediatric pyeloplasty with robotic assistance [J]. *J Endourol*, 2006, 21: 1137–1140.
- Passerotti CC, Diamond DA, Borer JG, et al. Robot-assisted laparoscopic ureteroureterostomy: description of technique [J]. *J Endourol*, 2008, 22: 581–584.
- Meehan JJ, Elliott S, Sandler A. The robotic approach to complex hepatobiliary anomalies in children: preliminary report [J]. *J Pediatr Surg*, 2007, 42: 2110–2114.
- Dawrant MJ, Najmaldin AS, Alizai NK. Robot-assisted resection of choledochal cysts and hepaticojejunostomy in children less than 10 kg [J]. *J Pediatr Surg*, 2010, 45: 2364–2368.
- Woo R, Le D, Albanese CT, et al. Robot-assisted laparoscopic resection of a type I choledochal cyst in a child [J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2006, 16: 179–183.
- Kang CM, Chi HS, Kim JY, et al. A case of robot-assisted excision of choledochal cyst, hepaticojejunostomy, and extracorporeal Roux-en-y anastomosis using the da Vinci surgical system [J]. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech*, 2007, 17: 538–541.
- Meehan JJ, Sandler AD. Robotic resection of mediastinal masses in children [J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2008, 18(1): 114–119.
- DeUgarte DA, Teitelbaum D, Hirschl RB, et al. Robotic extirpation of complex massive esophageal leiomyoma [J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2008, 18(2): 286–289.
- Meehan JJ, Phearman L, Sandler A. Robotic pulmonary resections in children: series report and introduction of a new robotic instrument [J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2008, 18(2): 293–295.
- Meininger D, Byhahn C, Markus BH, et al. Total endoscopic Nissen fundoplication with the robotic device “da Vinci” in children. Hemodynamics, gas exchange, and anesthetic management [J]. *Anaesthesist*, 2001, 50: 271–275.
- Meininger DD, Byhahn C, Heller K, et al. Totally endoscopic Nissen fundoplication with a robotic system in a child [J]. *Surg Endosc*, 2001, 15: 1360.
- Gettman MT, Neururer R, Bartsch G, et al. Anderson-Hynes dismembered pyeloplasty performed using the da Vinci robotic system [J]. *Urology*, 2002, 60: 509–513.
- Cundy TP, Harling L, Marcus HJ, et al. Meta analysis of robot-assisted versus conventional laparoscopic fundoplication in children [J]. *J Pediatr Surg*, 2014, 49: 646–652.
- Cundy TP, Harling L, Hughes-Hallett A, et al. Meta analysis of robot-assisted versus conventional laparoscopic and open pyeloplasty in children [J]. *BJU Int*, 2014, 114: 582–594.
- Bonnard A, Fouquet V, Carricaburu E, et al. Retroperitoneal laparoscopic versus open pyeloplasty in children [J]. *J Urol*, 2005, 173: 1710–1713.
- Reed MJ, Williams MP. Open pyeloplasty in children: experience with an improved stenting technique [J]. *Urol Int*, 2003, 71: 201–203.
- Atug F, Woods M, Burgess SV, et al. Robotic assisted laparoscopic pyeloplasty in children [J]. *J Urol*, 2005, 174: 1440–1442.
- Olsen LH, Rawashdeh YF, Jorgensen TM. Pediatric robot assisted retroperitoneoscopic pyeloplasty: a 5-year experience [J]. *J Urol*, 2007, 178: 2137–2141.
- Dangle PP. Outcomes of infants undergoing robot-assisted laparoscopic pyeloplasty compared to open repair [J]. *J Urol*, 2013, 190, 6: 2221–2226.
- Bansal D. Infant robotic pyeloplasty: comparison with an

- open cohort[J]. J Pediatr Urol, 2014, 10(2): 380-385.
- 29 Subotic U, Rohard I, Weber DM, et al. A minimal invasive surgical approach for children of all ages with ureteropelvic junction obstruction[J]. J Pediatr Urol, 2012, 8: 354-358.
- 30 Riachy E, Cost NG, Defoor WR, et al. Pediatric standard and robot-assisted laparoscopic pyeloplasty: a comparative single institution study[J]. J Urol, 2013, 189: 283 - 287.
- 31 黄格元, 蓝传亮, 刘雪来, 等. 达芬奇机器人在小儿外科手术中的应用(附 20 例报告)[J]. 中国微创外科杂志, 2013, 13(1): 4-8.
- 32 Tasian GE, Wiebe DJ, Casale P. Learning Curve of robotic assisted pyeloplasty for pediatric urology fellows [J]. J Urol, 2014, 190: 1622-1626.
- 33 Sukumar SI. Minimally invasive vs open pyeloplasty in children: the differential effect of procedure volume on operative outcomes[J]. Urology, 2014, 84(1): 180-184.
- 34 Lucian Panait, Shohan Shetty, Patricia A, et al. Do laparoscopic skills transfer to robotic surgery? [J]. J Surg Res, 2014, 187: 53-58.
- 35 Stefanidis D, Wang F, Korndorffer JR Jr, et al. Robotic assistance improves intracorporeal suturing performance and safety in the operating room while decreasing operator workload[J]. Surg Endosc, 2010, 24: 377.
- 36 Hagen ME, Wagner OJ, Inan I, et al. Impact of IQ, computer-gaming skills, general dexterity, and laparoscopic experience on performance with the da Vinci surgical system[J]. Int J Med Robot, 2009, 5: 327.
- 37 Chang L, Satava RM, Pellegrini CA, et al. Robotic surgery: identifying the learning curve through objective measurement of skill[J]. Surg Endosc, 2003, 17: 1744.
- 38 Thakre AA, Bailly Y, Sun LW, et al. Is smaller workspace a limitation for robot performance in laparoscopy? [J]. J Urol, 2008, 179: 1138-1142.
- 39 Finkelstein JB, Levy AC, Silva MV, et al. How to decide which infant can have robotic surgery? Just do the math [J]. Journal of Pediatric Urology, 2015, 11: 170. e1-e4.
- 40 Casale P. Robotic pediatric urology [J]. Expert Rev Med Dev, 2008, 5: 59-64.
- 41 Meehan JJ. Robotic surgery in small children: is there room for this? [J]. J Laparoendosc Adv Surg Technol A, 2009, 19: 707-712.
- 42 Van Haasteren G, Levine S, Hayes W. Pediatric robotic surgery: early assessment [J]. Pediatrics, 2009, 124: 1642 - 1649.
- 43 Lambert G, Fourcade L, Centi J, et al. How to successfully implement a robotic pediatric surgery program: lessons learned after 96 procedures [J]. Surg Endosc, 2013, 27: 2137-2144.
- 44 Basto M, Sathianathan N, Marvelde LT, et al. A patterns of care and health economic analysis of robotic radical prostatectomy in the Australian public health system [J]. BJU Int, 2015, doi: 10.1111/bju.13317
- 45 Moss RL, Henry MC, Dimmitt RA, et al. The role of prospective randomized clinical trials in pediatric surgery: state of the art? [J]. J Pediatr Surg, 2001, 36: 1182 - 1186. ?
- 46 Ostlie DJ, St Peter SD. The current state of evidence-based pediatric surgery[J]. J Pediatr Surg, 2010, 45: 1940-1946.
- 47 Rangel SJ, Henry MC, Brindle M, et al. Small evidence for small incisions: pediatric laparoscopy and the need for more rigorous evaluation of novel surgical therapies[J]. J Pediatr Surg, 2003, 38: 1429-1433.
- 48 Camps JI. The use of robotics in pediatric surgery: my initial experience [J]. Pediatr Surg Int, 2011, 27: 991-996.
- 49 Kasturi S, Sehgal SS, Christman MS, et al. Prospective long-term analysis of nerve-sparing extravesical robotic-assisted laparoscopic ureteral reimplantation[J]. Urology, 2012, 79: 680-683.
- 50 Minnillo BJ, Cruz JA, Sayao RH, et al. Long-term experience and outcomes of robotic assisted laparoscopic pyeloplasty in children and young adults [J]. J Urol, 2011, 185: 1455-1460.
- 51 Lindgren BW, Hagerty J, Meyer T, et al. Robot-assisted laparoscopic surgery in children: does it apply to all levels of the ureter? Presented at the 22nd Annual Congress of the International Pediatric Endosurgery Group, San Diego, CA, June 17-22, 2012,
- 52 Vitiello V, Lee SL, Cundy TP, et al. Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery [J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2013, 6: 111-126.
- 53 Looi T, Yeung B, Umasthan M, et al. KidsArm-an image-guided pediatric anastomosis robot. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, 4105-4110.
- 54 Kaouk JH, Haber GP, Autorino R, et al. A novel robotic system for single-port urologic surgery: first clinical investigation [J]. Eur Urol, 2014, 66: 1033-1043.
- 55 Leonard S, Wu KL, Kim Y, et al. Smart tissue anastomosis robot (STAR): a vision-guided robotics system for laparoscopic suturing [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2014, 61: 1305-1317.

(收稿日期: 2015-11-20)

(本文编辑: 尹 强)