

机器人心脏外科手术的发展历史和现状

孙家琪, 钟前进

(陆军特色医学中心心血管外科 重庆 410072)

摘要 机器人手术是一种新兴的微创手术方式, 其优势在于更小的创口、更少的疼痛、更短的住院时间、更快的恢复速度及更好的美容效果。目前, 机器人心脏手术已经广泛应用于各类心脏疾病的治疗, 包括先天性心脏病、心脏瓣膜病、冠心病和心脏肿瘤等, 在心脏手术领域已取得了长足的发展, 但临床应用落后于其他外科机器人手术, 在未来仍有较大的发展空间。

关键词 机器人手术系统; 心脏手术; 微创外科

中图分类号 R654 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2021) 06-0415-06

History and current status of robotic cardiac surgery

SUN Jiaqi, ZHONG Qianjin

(Department of Cardiovascular Surgery, Army Characteristic Medical Center, Chongqing 410072, China)

Abstract Robotic cardiac surgery is a new minimally invasive approach to heart surgery, which has advantages of smaller scar, less pain, shorter hospital stay, faster recovery and better aesthetics. Nowadays, robotic cardiac surgery has been applied into variety of cardiac diseases, including congenital heart disease, valvular heart disease, coronary heart disease and cardiac tumor, et al. But the development of robotic surgery to heart falls behind other robotic surgeries for now, and there is still a long way to go in the future.

Key words Robotic surgery system; Cardiac surgery; Minimally invasive surgery

收稿日期: 2021-06-16 录用日期: 2021-08-11

Received Date: 2021-06-16 Accepted Date: 2021-08-11

基金项目: 全机器人心脏手术系列关键技术的研究 (CX2019LC117)

Foundation Item: Key Technology Research on Total Robotic Cardiac Surgery (CX2019LC117)

通讯作者: 钟前进, Email: zhongqianjin@qq.com

Corresponding Author: ZHONG Qianjin, Email: zhongqianjin@qq.com

引用格式: 孙家琪, 钟前进. 机器人心脏外科手术的发展历史和现状 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2021, 2 (6): 415-420.

Citation: SUN J Q, ZHONG Q J. History and current status of robotic cardiac surgery [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2021, 2 (6): 415-420.

1 全球首例机器人心脏外科手术

1998年5月7日,全球首台机器人手术,也是首台机器人心脏手术由Carpentier A实施^[1]。该手术采用的是达芬奇机器人系统的原型机。Carpentier A和Loulmet D于1997年8月~1998年4月利用动物和尸体进行了必要的实验和培训,并且通过了伦理委员会批准。手术为房间隔瘤切除和房缺自体心包补片修补。患者女,52岁,2月前因中风接受检查,诊断为房间隔缺损和房间隔瘤,分别为3cm×2cm和1cm。手术采用右乳房下小切口和部分右胸骨切开,胸部切口大小为6cm×4cm,3个机械臂经该切口入胸,进入手术部位(心包和右心房)。该手术房缺修补时长2h,主动脉阻断时间为3h,总时长8h,失血480ml。患者于术后8d顺利出院。

2 各地区机器人心脏外科手术的起步

2.1 北美机器人心脏外科手术的起步

北美第1例达芬奇机器人辅助下二尖瓣成形术于2000年5月由Chitwood团队^[2]实施成功。该团队后续陆续开展了20例机器人辅助下二尖瓣成形术,手术预后较好。该研究也成为美国FDA一期临床实验的一部分,推动了二期临床实验的开展。二期实验包含了10个中心112例患者,通过达芬奇机器人完成了不同类型的二尖瓣成形术,其中0例死亡。随访结果显示,术后1个月,轻度或轻度以上反流患者占8%,仅有5%的患者因为反流问题需要再次手术,而其他无反流或轻微反流患者占92%^[3]。

根据以上临床实验结果,美国FDA于2002年批准达芬奇机器人手术系统用于二尖瓣成形手术,自此北美机器人心脏手术得以推广应用。

2.2 亚洲机器人心脏外科手术的起步

2005年7月,韩国卫生和福利部批准达芬奇机器人为医疗器械,韩国延世大学Severance医院开始在韩国开展机器人手术^[4]。2007年1月15日中国大陆首例全机器人房间隔缺损修补术在解放军总医院完成^[5]。2009年11月达芬奇机器人获得日本厚生劳务省(Ministry of Health, Labor, and Welfare, MHLW)批准^[6]。

3 不同疾病机器人心脏外科手术的开展

3.1 二尖瓣修复手术

2006年美国宾夕法尼亚大学对39例患者进行了单中心非随机临床试验,结果表明机器人手术较传统开胸术式具有更短的住院时间(7.1d Vs 10.6d, $P=0.04$)^[7]。2008年美国Chitwood WR等^[8]报道了共计300例单中心非随机临床实验结果,即刻修复后超声心动图显示无或轻微反流者292例(97.4%),轻度反流者5例(1.6%),中度反流者3例(1%),无重度患者。平均住院时间为(5.2±4.2)d,累计有16例(5.3%)患者需要再次手术。Mihaljevic T等^[9]比较机器人手术(261例)与全胸骨切开(114例)、部分胸骨切开术(270例)、和右前外侧小切口开胸术(114例)进行的二尖瓣修复术。在体外循环时间上,机器人手术比全胸骨切开术长42min,比部分胸骨切开术长39min,比前外侧小切口开胸术长11min($P<0.0001$)。在住院时间上,机器人手术最短,中位数为4.2d,比其他3种开胸手术分别短1.0d、1.6d和0.9d。3种手术方式均无院内死亡。机器人手术组心房颤动和胸腔积液发生率最低。

2018年Hawkins RB等^[10]进行了一项二尖瓣手术的多中心研究(2351例),分为机器人

手术组 ($n=372$)、微创手术组 ($n=576$) 和常规胸骨切开术组 ($n=1352$)。结果表明, 机器人组和微创手术组的二尖瓣修复率较高 (91%), 常规胸骨切开术组较低 (76%, $P<0.0001$)。常规胸骨切开术组时间为 224min, 微创手术为 222min, 机器人手术为 180min ($P<0.0001$)。住院时间方面, 机器人手术比传统常规胸骨切开术住院时间减少约 1d。然而, 相对于微创手术组, 机器人手术组具有更高的输血率 (15% Vs 5%, $P<0.0001$)、心房颤动率 (26% Vs 18%, $P=0.01$), 平均住院时间延长 1d ($P=0.02$)。同时, 该研究发现, 机器人手术具有更长的主动脉阻断时间、体外循环时间和手术室时间。

综上所述, 机器人二尖瓣修复同其他手术途径的手术效果相似, 可作为标准术式。

3.2 先天性心脏病

2001 年, Torracca L 等^[11]报道了 6 例机器人房间隔缺损修补术, 平均 CPB 时间 (106 ± 22) min, 主动脉阻断时间 (67 ± 13) min。2003 年, Argenziano M^[12]报道了 17 例机器人辅助心脏手术, 包括 12 例房间隔缺损修补术和 5 例动脉导管未闭封堵术, 其阻断时间中位数为 32min, 体外循环时间中位数为 122min, ICU 时间中位数为 20h。2005 年, 波士顿儿童医院^[13]报道了从 2002~2004 年使用达芬奇机器人手术系统进行的动脉导管未闭结扎术 9 例。所有患者于手术室内成功拔管, 动脉导管未闭和血管环患者平均术后住院时间分别为 1d 和 2.2d。2010 年, GAO C Q 等^[14]报道了 20 例全机器人下房间隔缺损修补术, 平均体外循环时间为 (94.3 ± 26.3) min, 主动脉阻断时间 (39.1 ± 12.9) min, 平均手术时间为 (225.0 ± 34.8) min。同年, GAO C Q 等^[15]也首次报道了 24 例不停跳全机器人辅助下房间隔缺损修补术, 其平均体外循环时间为

(65.6 ± 17.7) min, 平均手术时间为 (98.5 ± 19.3) min, 手术全部取得成功, 且无患者需要输红细胞, ICU 时间为 (0.5~1) d, 住院时间为 (4~5) d。

3.3 冠状动脉旁路移植术

1998 年, Loulmet D 等^[16]使用第一代达芬奇手术系统首次报道了机器人手术系统实行 CABG 的研究。其中包括 2 例机器人获取乳内动脉和 2 例全机器人冠状动脉旁路移植术 (全程 TECAB)。2005 年, Srivastava S 等^[17]报道的 150 例机器人辅助下冠状动脉旁路移植手术所有病例中, 无心肌梗死、卒中、切口感染等, 无死亡, 4 例因出血再次开胸, 平均住院时间 3.6d。术后 3 个月对 55 例行 CTA 检查, 未见桥血管狭窄。2006 年 Argenziano M 等^[18]报道一项多中心临床试验, 共有 13 个中心 98 例前降支搭桥术入选, 85 例成功接受手术, 5 例术中改为正中开胸。患者平均体外循环时间 (117 ± 44) min, 主动脉阻断时间 (71 ± 26) min, 住院时间 (5.1 ± 3.4) d, 3 个月时无须二次再血管化治疗的比例为 91%, 该结果同时也为美国 FDA 批准达芬奇机器人应用于冠脉搭桥术提供重要依据。2013 年 Bonaros N 等^[19]报道了两个中心 500 例机器人辅助下冠脉搭桥术 (包括 334 例单支, 150 例双支, 15 例三支以及 1 例四支), 手术平均时间为 305min, 体外循环时间为 98min, 主动脉阻断时间为 73min。其中 80% 手术取得成功, 无须再次手术或者术中转换为大切口。在住院时间方面, Lee J D 等^[20]报道了两个不同中心的 541 例全机器人冠状动脉旁路移植术 (Totally endoscopic coronary artery bypass grafting, TECAB) 患者的住院时间, 住院时间的中位数为 6d (2~54) d, 平均 7.35d。2011 年高长青等^[21]报道了 12 例应用达芬奇机器人系统行非体外循环冠状动脉旁路移植与支

架置入“分站式杂交”手术治疗多支冠状动脉病变的病例。全组无死亡和并发症。平均ICU时间42 h, 无心血管事件。平均引流量80 ml。术后第2d即可下床活动。支架置入术后3~5d出院。

3.4 心脏肿瘤

2005年Murphy D A等^[22]报道3例机器人辅助下左房肿瘤切除, 术中经右房-房间隔路径进入左房或直接左房切口, 肿瘤切除后利用自体心包片修补缺损的房间隔。Mohammed H等^[23]于2012年第一次报道了机器人辅助切除左心室黏液瘤, 证实了机器人手术切除是治疗左心室黏液瘤的一种可行的手术方式。同年, Schilling J等^[24]报道了17例机器人辅助和40例非机器人左房黏液瘤切除术, 结果表明机器人手术的手术时间明显短于传统手术方式(2.7h Vs 3.5h), 由此认为机器人手术系统用于心脏肿瘤的切除是安全的, 可能是在特定的患者人群中替代传统术式的一种可行方法。

3.5 其他手术类型

2004年Derose J J等^[25]报道了13例机器人辅助下心室电极植入术, 其中有6例曾接受过冠脉搭桥术, 所有患者无并发症, 无手术失败。同年, Gerosa G等^[26]率先报道了机器人辅助下治疗心房纤颤的病例。患者为64岁男性, 阵发性房颤, 采取了3个1cm大小的孔洞进行手术, 随访3月, 为窦性心律, 无心律失常。2012年Nifong L W等^[27]报道了86例患者在接受二尖瓣修复术的同时行“冷冻迷宫术”, 83例患者无心房颤动, 该研究结果表明机器人辅助的手术方式可能是一种理想的心房颤动微创治疗手术方法。

4 机器人心脏外科手术的现状

据统计, 截至2021年3月31日, 达芬奇

手术机器人系统在全球共装机6 142台。而在中国, 仅有218台。这说明我国在手术机器人领域尚存在较大的发展空间。

目前, 国内共有218家中心开展了机器人手术, 累计完成215 972例机器人手术。其中, 全机器人心脏手术共计2 876例(截至2021年4月30日), 仅占1.58%, 且开展的种类非常有限。这主要是因为机器人心脏手术仍存在较多的局限性: ①局部与整体的矛盾: 局部清晰, 但整体视野欠佳; ②机械臂与胸壁范围的矛盾: 限制了低龄低体重患者的使用; ③器械交换频繁, 影响手术速度; ④器械相对短缺, 不能满足心脏手术的需要; ⑤镜头起雾、污染, 影响操作; ⑥单侧胸腔径路限制了手术拓展; ⑦细微精细操作(缝合)需要更长时间学习和培训。机器人手术系统也因此也面临着诸多困境, 比如手术所覆盖的病种有限、手术术式有待拓展、体外循环时间和主动脉阻断时间较长、费用较高、社会和行业认可度有待提高、规模尚需扩大、有待多中心、大样本的随机对照研究进一步证实。

5 机器人手术的发展趋势

在设备的更新和进步上, Intuitive Surgical公司于2014年发布了机器人手术系统第四代产品—Da Vinci Xi。新一代产品大幅改进了驱动结构, 使得机械臂移动范围更灵活精准, 可覆盖更广的手术部位; 与以往的12mm内窥镜不同, 采用了全新的8mm内窥镜, 数字内窥镜更加轻巧, 使用激光定位并可自动计算机械臂的最佳手术姿态, 画面成像更清晰, 3D立体感更准确。触觉反馈是目前手术机器人普遍面临的问题, 缺乏触觉反馈可能会导致手术操作的不适应。澳大利亚的Herosurg通过在机械臂上增加传感系统产生触觉反馈, 并将触感反馈到医师的手

上，从而解决了这一问题。未来更新版本的机器人手术系统的研发，也将为机器人心脏手术带来全新的进步。

华为联合中国联通福建分公司、福建医科大学孟超肝胆医院、中国人民解放军总医院、苏州康多机器人有限公司等成功实施了 5G 远程外科手术动物实验，这也是世界首例 5G 远程外科手术。在未来，5G 网络普及以后，远程医疗的实现或许成为可能，也是机器人手术的一个发展方向。

人工智能（Artificial intelligence, AI）是未来的科技发展方向，或许未来会出现智能 AI 操控机械臂进行自主手术，真正地解放了医师的双手。

6 总结

目前的机器人系统基本为美国生产，国内售价为两千多万元人民币一台，对患者和医院的负担较重，同时其维护费用也较为高昂。中国自主研发的机器人系统或可改变这一现状。2014 年 4 月，中南大学湘雅三医院顺利完成了 3 例国产机器人手术，这是我国自主研发的手术机器人系统首次运用于临床。2021 年 5 月，北京大学第一医院报道了 26 例采取国产康多手术机器人在肾部分切除术中的初步临床应用^[28]，证明该国产手术机器人在肾切除手术中安全、有效。

机器人手术对于医师的操作技能有更高的要求，一个成熟的团队对于手术的整体成功率和效率具有至关重要的作用。未来，机器人手术培训体系应更加成熟，机器人操作团队也更加专业化。同时在手术术式上，机器人心脏手术可以拥有更多的适应证，对胸壁的打孔数量也可以适当进行减少，同时对低身高、低体重、

低年龄的患者也尝试进行手术，或者是通过不同路径进行手术例如左侧路径手术。

综上所述，机器人心脏手术目前仍有较大的发展空间，如何发展机器人心脏手术具有较大的临床意义。

参考文献

- [1] Carpentier A, Loulmet D, Aupècle B, et al. Computer assisted open heart surgery. First case operated on with success[J]. Comptes Rendus de l Acad é mie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie, 1998, 321(5): 437-442.
- [2] Chitwood W R Jr, Nifong LW, Elbeery J E, et al. Robotic mitral valve repair: trapezoidal resection and prosthetic annuloplasty with the da Vinci surgical system[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2000, 120(6): 1171-1172.
- [3] Nifong L W, Chitwood W R, Pappas P S, et al. Robotic mitral valve surgery: a United States multicenter trial[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2005, 129(6): 1395-1404
- [4] Hoon K D, Sik J W, Won P J, et al. Efficacy and safety of robotic procedures performed using the da Vinci robotic surgical system at a single institute in Korea: experience with 10000 Cases[J]. Yonsei Medical Journal, 2018, 59(8): 975.
- [5] 高长青, 杨明, 王刚, 等. 全机器人不开胸心脏手术 4 例 [J]. 中华胸心血管外科杂志, 2007, 23(1): 19-21.
- [6] Ishikawa N, Watanabe G, Tomita S, et al. Japan's First robot-assisted totally endoscopic mitral valve repair with a novel atrial retractor[J]. Artificial Organs, 2010, 33(10): 864-866.
- [7] Woo Y J, Ba E A N. Robotic minimally invasive mitral valve reconstruction yields less blood product transfusion and shorter length of stay[J]. Surgery, 2006, 140(2): 263-267.
- [8] Chitwood W R, Rodriguez E, Chu W A, et al. Robotic mitral valve repairs in 300 patients: a single-center experience[J]. The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery, 2008, 136(2): 436-441.
- [9] Mihaljevic T, Jarrett C M, Gillinov A M, et al. Robotic

- repair of posterior mitral valve prolapse versus conventional approaches: potential realized[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2011, 141(1): 72–80.e1–4.
- [10] Hawkins R B, Hunter M J, Mullen M M, et al. A propensity matched analysis of robotic, minimally invasive, and conventional mitral valve surgery[J]. *Heart*, 2018. DOI: 10.1136/heartjnl-2018-313129
- [11] Torracca L, Ismeno G, Alfieri O. Totally endoscopic computer-enhanced atrial septal defect closure in six patients[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2001, 72(4): 1354–1357.
- [12] Argenziano M. Totally endoscopic atrial septal defect repair with robotic assistance[J]. *Circulation*, 2002, 5(3): 294–300.
- [13] Suematsu Y, Mora B N, Mihaljevic T, et al. Totally endoscopic robotic-assisted repair of patent ductus arteriosus and vascular ring in children[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2005, 80(6): 2309–2313.
- [14] GAO C Q, YANG M, WANG G, et al. Totally endoscopic robotic ventricular septal defect repair in the adult[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2012, 144(6): 1404–1407.
- [15] GAO C Q, YANG M, WANG G, et al. Totally endoscopic robotic atrial septal defect repair on the beating heart[J]. *Heart Surgery Forum*, 2010, 13(3): 155–158.
- [16] Loulmet D, Carpentier A, d’Attellis N, et al. Endoscopic coronary artery bypass grafting with the aid of robotic assisted instruments[J]. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 1999, 118(1): 4–10.
- [17] Srivastava S, Ga Da Salli S, Agusala M, et al. Use of bilateral internal thoracic arteries in CABG through lateral thoracotomy with robotic assistance in 150 patients[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2006, 81(3): 800–806.
- [18] Argenziano M, Katz M, Bonatti J, et al. Results of the prospective multicenter trial of robotically assisted totally endoscopic coronary artery bypass grafting[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2006, 81(5): 1666–1675.
- [19] Bonaros N, Schachner T, Lehr E, et al. Five hundred cases of robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting: predictors of success and safety[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2013, 95(3): 803–812.
- [20] Lee J D, Bonaros N, Hong P T, et al. Factors influencing hospital length of stay after robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting[J]. *The Annals of Thoracic Surgery*, 2013, 95(3): 813–819.
- [21] 高长青, 杨明, 吴扬, 等. 机器人非体外循环冠状动脉旁路移植与支架置入“杂交”手术治疗多支冠状动脉病变[J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2011, 27(7): 398–400.
- [22] Murphy D A, Miller J S, Langford D A. Robot-assisted endoscopic excision of left atrial myxomas[J]. *Journal of Thoracic & Cardiovascular Surgery*, 2005, 130(2): 596–597.
- [23] Mohammed H, Michael S J. Robotic assisted excision of a left ventricular myxoma[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2012(1)113–114.
- [24] Schilling J, Engel A M, Hassan M, et al. Robotic Excision of atrial myxoma[J]. *Journal of Cardiac Surgery*, 2012, 27(4): 423–426.
- [25] Derose J J, Belsley S, Swistel D G, et al. Robotically assisted left ventricular epicardial lead implantation for biventricular pacing: the posterior approach[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2004, 77(4): 1472–1474.
- [26] Gerosa G, Bianco R, Buja G, et al. Totally endoscopic robotic-guided pulmonary veins ablation: an alternative method for the treatment of atrial fibrillation[J]. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, (2): 450–452.
- [27] Nifong L W, Rodriguez E, Chitwood Jr W R. 540 Consecutive robotic mitral valve repairs including concomitant atrial fibrillation cryoablation[J]. *Annals of Thoracic Surgery*, 2012, 94(1): 38–43.
- [28] 李学松, 樊书菠, 熊盛炜, 等. 国产内窥镜手术机器人系统在肾部分切除术中的初步临床应用[J]. *中华泌尿外科杂志*, 2021, 42(5): 375–380.