



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012
Chinese Journal of General Surgery, 2021, 30(12):1477-1484.

· 文献综述 ·

血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状

何昊^{1,2}, 叶子健^{1,2}, 舒畅^{1,2,3}

(1. 中南大学湘雅二医院 血管外科, 湖南 长沙 410011; 2. 中南大学血管病研究所, 湖南 长沙 410011; 3. 中国医学科学院阜外医院 血管外科, 北京 100037)

摘要

血管介入治疗作为一种微创治疗方法已被血管外科、心血管内外科及神经内外科等不同学科所广泛应用。传统血管介入手术依靠透视下手对导管导丝的操作, 可持续性 & 精确性存在一定问题; 同时操作者在长期 X 射线暴露及铅防护围裙负重中承担了较高的职业危害风险。血管介入机器人系统具有明显减少操作者 X 射线暴露、成像定位精准、操作准确稳定的优点, 在减少器械与血管壁接触、操作颤抖的同时, 增加操作者舒适感, 目前已经成为医疗机器人的研究热点。笔者在此介绍血管介入手术机器人系统的图像导航、机械臂结构、力反馈及安全性能等关键技术, 并对目前国内外血管介入手术机器人系统的研究进展进行阐述, 通过临床应用阐明该技术在血管介入手术机器人系统中的重要意义, 探讨关键技术的发展趋势。尽管技术的进步使得血管介入手术机器人系统有了长足发展, 但需要看到的是, 目前的介入手术机器人系统仍然存在较多不足: 触觉力学反馈的缺乏使其在复杂困难病变、钙化病变、慢性闭塞病变中的应用受到了限制; 同时缺乏适用操控各类目前已经商品化的导丝、导管、球囊、支架等血管腔内器具, 频繁更换介入器材会导致手术时间的增加, 进一步降低了手术的可操控性。人工智能与 5G 通信技术的快速发展, 将为机器人系统辅助下的血管介入手术提供更加精准化、规范化的发展方向。并且在人工智能基础上, 血管介入机器人系统与腔内影像设备的一体化融合及虚拟现实技术的应用将为精准血管介入提供更为广阔的前景, 指明了血管介入手术机器人系统未来研究方向。血管介入手术机器人系统的发展, 是符合目前对于精准医疗的趋势, 为血管介入医师提供一种保护, 但仍然需要更多的时间去完善、精进这项技术, 同时需要制定其应用的适应证和禁忌证, 建立标准程序, 并通过大量临床试验来评估血管介入机器人系统的长期疗效, 使得这项技术能够得到更广泛的应用。

关键词

血管内操作; 最小侵入性外科手术; 机器人; 综述
中图分类号: R654.3

Essential techniques and current research situation in robotic endovascular systems

HE Hao^{1,2}, YE Zijian^{1,2}, SHU Chang^{1,2,3}

(1. Department of Vascular Surgery, the Second Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410011, China; 2. the Institute of Vascular Diseases, Central South University, Changsha 410011, China; 3. Department of Vascular Surgery, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Science and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China)

基金项目: 湖南省长沙市科技重大专项基金资助项目 (kh2102014)。

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2021-10-25。

作者简介: 何昊, 中南大学湘雅二医院副主任医师, 主要从事血管外科疾病基础及临床方面的研究。

通信作者: 舒畅, Email: shuchang@csu.edu.cn

Abstract

As a minimally invasive treatment, endovascular therapy has been widely used in different disciplines such as vascular surgery, both interventional cardiology and cardiovascular surgery as well as neurosurgery. There are some problems in sustainability and accuracy in traditional vascular interventional surgery that is operated by manipulation of the catheter and guide wire with hands under X-ray fluoroscopy, meanwhile the operators are at high risk of occupational hazards from long-term X-ray exposure and the burden of the lead apron. The robotic system for endovascular intervention has the advantages of significantly reducing the exposure of the operators to radiation, accurate imaging positioning, as well as precise and stable operation. It not only reduces the contact between the instrument and the vessel wall and minimizes the uncontrolled tremors, but also increases the operator's sensation of comfort, which has currently become the research hotspot of medical robot. Here, the authors introduce some key techniques of endovascular intervention robot system, such as image navigation, structure of mechanical arm, force feedback and safety performance, and describe the progress of endovascular intervention robot system at home and abroad, and also illustrate the importance of these techniques through their clinical applications, and then discuss the development trend of these key techniques. Although the progress of technology has greatly promoted the development of robotic endovascular system, it should be noted that there are still many deficiencies. For example, the lack of haptic feedback limits its application in complex and difficult lesions, such as calcified lesions and chronic occlusive lesions. At the same time, there is a lack of endovascular intervention instruments applicable for the currently commercialized guide wires, catheters, balloons and stents. Frequent replacement of interventional devices will lead to an increase in surgical time and further reduce the controllability of surgery. The rapid development of artificial intelligence and 5G communication technology will provide a more accurate and standardized development direction for endovascular intervention robot system. Furthermore, on the basis of artificial intelligence, the integration of robotic endovascular system with endovascular imaging equipment and the application of virtual reality technology provides a broader prospect for precise vascular interventional surgery, and points out the future research direction. The development of endovascular intervention robot system complies with the present trend of precision medicine, and provides protections for vascular interventional physicians. However, this technology still needs some more time for improvement and perfection, and defining the indications and contraindications, as well as establishing a standard procedure, and assessing the long-term efficacy by a number of clinical trials, so that it can be used more widely.

Key words

Endovascular Procedures; Minimally Invasive Surgical Procedures; Robotics; Review

CLC number: R654.3

根据《中国心血管健康与疾病报告(2019)》, 心血管病危险因素对居民健康的影响愈加显著, 心血管病的发病率仍持续增高, 给居民和社会带来的经济负担日渐加重, 已成为重大的公共卫生问题^[1]。目前微创血管介入手术已经成为治疗血管疾病的主流方法^[2]。在传统的血管介入手术中, 医生在X线透视下利用穿刺针、导丝、导管等器械经血管途径进行诊断与治疗。但是血管介入手术也存在明显弊端: (1) 医生长时间在X射线环境下工作, 因职业风险而罹患不同程度

的放射性损伤, 如皮肤损伤、白内障、脊柱疾病以及诱发恶性肿瘤和导致基因突变可能^[3-5]。(2) 由于操作复杂、手术时间长, 医生为了减少辐射而穿戴的铅衣也会带来操作的不便和关节损伤。这些缺点限制了血管介入手术的广泛应用, 外科手术机器人与血管介入技术的有机结合的血管介入机器人系统是解决上述问题的重要途径。机器人操纵介入手术器械, 在术中影像精确定位下, 能够无颤动地执行持续动作, 同时快速、精确定位到达目标血管, 最后在医生的操作下或自主地完

成血管介入手术,将医生从辐射环境中解放出来,并且为通过无线连接进行远程血管内介入治疗提供了机会。在血管外科,介入辅助操作机器人系统也逐渐开始应用于血管腔内治疗,机器人的引入能显著改善介入疗效,目前已成为国内外研究热点^[6]。本综述旨在阐述血管介入手术机器人系统的关键技术及其在血管领域的研发及临床应用现状、限制性及将来发展方向。

1 血管介入手术机器人系统的关键技术

血管介入手术机器人系统主要根据术前或术中的影像数据构建三维血管内外影像,通过建立空间参考坐标系以及对血管分叉处、角度、弹性、斑块特征的分析,并在手术过程中跟踪、定位介入手术器械,实现医生通过远程操作方式在导航系统引导下利用移动机械手臂操作导管导丝等介入器材为患者进行精确的血管介入手术,辅助医生高质量地完成手术操作。其所应具备的关键技术如下。

1.1 图像导航技术

导航系统是术者更是血管介入手术机器人的眼睛,常规的血管介入手术中医生通过血管成像来判断介入手术器械的位置,执行血管介入操作,因此血管成像的精度对手术安全十分重要。三维血管影像可多角度显示病变,避免二维平面投影带来的图像不清晰的弊端,更易于医生观察诊断。利用视觉定位系统获取C臂的位置参数是导航系统实现的前提,双角度数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)图像能实现血管三维快速重建,在此基础上进行导航定位和引导介入手术。除此以外还可通过术前计算机断层扫描(computerized tomography, CT)数据和术中导丝磁定位、送管装置送管长度等信息,从而获得术中导丝在患者血管中的精确位置,并通过三维重建的血管图像直观地展现给医生。

1.2 机械臂结构

血管介入手术属于精细操作,因此血管介入手术机器人机械臂在完成把持、定位、推送、旋转导管等操作时,同样应具备很高的柔顺性和灵活性,同时完成任务需要多余个活动度,才能保证导管快速、安全传递到病灶区。传统的机器人机构不能满足这些特征,因此需要开发具有利用

零空间的自运动产生不同的关节活动的机器人,从而使机器人能够躲避障碍、灵活性提高以及获得较好的动力性能等,进而适合微创外科手术复杂操作的需求^[7-8]。

1.3 力反馈系统

手术机器人系统与传统手术最大的区别是缺乏手指的直接接触,触觉丧失会使操作者手眼协调困难,尤其在血管介入手术过程中医生仅依靠成像难以估计操作力度,容易造成血管破裂。在血管介入手术机器人中结合力反馈技术的目标是实现手术过程的“实体化”,让手术医生感觉不到是在远程操作,而是直接接触患者。这就要求同时解决接触力的测量以及如何通过触觉交互设备将力反馈到外科医生手上的问题。导管与血管壁的接触力可以通过在导管顶端集成压力传感器进行测量,除此以外还可以通过患者外部的传感器测量导管的近端力来估计导管与血管壁的接触力^[9-12]。

1.4 系统安全性能

血管介入机器人系统在操作过程中应避免对医生、患者、周围环境造成意外损伤,因此系统的安全性是一个不容忽视的问题。首先,设计机器人系统的硬件和软件时均要设置保护措施,以保证发生特殊情况时(如突然断电或地震时),机器人手臂可以立即制动,不会对医生和患者造成伤害,机器人工作失效时,医生可以接管机器人手臂继续完成手术,而且在手术进行时,要使机器人和医生协调配合、不会发生碰撞;其次,手术之前必须对手术区域进行消毒,这就要求机器人手臂便于装卸、易于消毒;再次,在控制层面,将采用容错技术和故障诊断技术,自动完成故障诊断、报警,从而提高整体手术过程的安全性。

2 血管介入机器人系统的研发进展

2.1 国外研发进展

国外有许多研究中心正在研究开发新型的遥控血管介入机器人系统,来满足血管介入外科手术的需要。在磁导航技术发展方面,美国Stereotaxis公司开发的第一代磁导航系统Telstar和第二代磁导航系统Niob能够通过数字显像系统相融合,整合磁铁旋转、倾斜运动与操作指令,从而调整导管角度和弯曲方向,必要时可重复同

样操作^[13]。另一款磁导航机器人系统为美国 Magnetecs 公司开发的导管导引控制与图像 (catheter guidance control with images, CGCI) 系统, 其特有的组织接触感应过滤设计, 能辅助导管产生连续组织接触, 导管滑脱时能通过快速反馈调节指引导管尖端重新接触组织。但是磁导航式的血管腔内手术机器人仍有一些缺点: (1) 必须应用特殊导丝、导管操作, 无法进行球囊、支架操作, 手术的大部分操作仍然需要人手完成; (2) 尽管存在导管尖端接触反馈, 但整个系统缺少实时接触力反馈; (3) 操作的距离和力量有限; (4) 设备庞大, 不具备移动能力, 对操作环境, 设施的要求较高, 学习周期及培训时间较长。

根据电机械原理 (即通过电动的机械手) 而设计的血管腔内手术机器人相对而言发展较晚。美国 Hansen 公司开发并研制的 Sensei Robotic Catheter 系统开始用于冠状动脉介入及消融治疗, 它通过机械手臂操作特定的导管及导管鞘头端来控制导管及鞘的运动^[14-15]。Magellan 手术机器人系统是 Hansen 公司基于 Sensei 平台进行重大改进的可远程引导的导管系统, 主要用于辅助介入治疗外周血管疾病, 其增加了硬件和软件集成, 以控制导管额外弯曲、导丝运动及机器人关节运动, 并配合改进的操控导管系统和多关节机器人远程导管控制; 相比于早期系统, 其血管操控导管 (vascular control catheter, VCC) 更为精细, 直径要小很多, 且成角能力更强, 有 6 个自由度操作功能, 同时进一步增强了组织触觉和视觉反馈, 实现导管顶端完整的旋转能力和独立的尖端扭矩控制^[16]。CorPath 机器人系统是美国 Corindus 血管手术机器人公司设计生产的开放系统平台, 相比于 Hansen 医疗公司产品, CorPath 系统更早实现了对导丝的操控技术, 可对病灶进行亚毫米级精准测量, 以便选择合适支架, 减少并发症发生^[17]; 然而其缺点在于装载血管介入器具的一次性操纵盒价格昂贵, 可应用的介入器具也有限, 且缺乏相应力触觉反馈机制, 不能同时操控一个以上导丝、球囊或支架。因此实际应用范围很有限。

2.2 国内研发进展

国内于 10 余年前亦开展了血管介入机器人的相关研发, 但部分研发团队仅是仿制和改进国外现有产品, 因此也有着相似的临床应用瓶颈。近年来国内部分研发团队打破原有设计思路和应用

瓶颈, 设计了新型血管介入机器人满足临床需求。2014 年海军总医院田增民教授团队^[18]在应用机器人辅助立体定向手术 1 400 余例和成功进行遥控操作外科手术的基础上, 通过分析血管介入手术的基本步骤后明确机器人的特点, 并进行了相关设计, 制成具有自主知识产权的血管介入机器人样机, 并成功开展了动物血管造影研究以及第一次临床试验暨腹主动脉及髂动脉造影术。为了解决机器手臂抓持不稳的问题, 有研究根据手术具体要求, 结合夹持爪的特点采用模块化设计思想, 设计了一种一次性可抛、夹持力可调的夹持爪, 可灵活地夹持导管导丝, 解决了消毒、打滑、伤害导丝等问题, 并实现的导丝导管不间断递送, 可进一步缩短手术时间^[19]。2018 年 Bao 等^[20]设计了一款新型遥控血管介入机器人, 设计主-从操作系统, 导管及导丝多单元控制, 压力传感器与导管导丝静态连接, 该机器人能够准确操作导管和导丝, 更加精准检测阻力并协同完成复杂的手术操作。海军军医大学附属长海医院陆清声教授团队^[21-23]研究开发的一款新型机器人辅助血管腔内介入系统, 通过体外模型实验及动物体内实验证明该系统能够完成复杂血管介入操作, 同时完成自膨式支架定位和释放操作。2019 年 Zhao 等^[24]提出了一种基于卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 的框架来解决基于外科医生技能学习的血管内机器人导航问题。结果表明, 基于 CNN 的算法具有较强的适应能力, 并取得了相似的成功率和平均操作时间, 机器人操作与手动操作具有相似的操作轨迹和相同的操作力水平。2019 年 Wang 等^[25]研究探索了新型开放式血管外科机器人, 实现与已有的导丝、导管、球囊等设备结合, 它利用 4 个机械手, 可独立实现夹紧、旋转和推拉导丝和导管, 亦可采用分布式控制系统对复杂运动进行实时高精度的协调, 完成血管介入操作, 提高了系统操作精确性以及安全性, 该系统方便拆卸及组装也节省了设备准备时间。2019 年 Shen 等^[26]提出了一种新型的图像引导主从机器人血管介入系统, 该机器人系统基于点对点远程通信系统、动力学分析、滑模神经网络自适应控制模型和反馈系统, 可实时完成导丝平移旋转、球囊导管平移、造影剂注射等一系列操作, 通过性能评估和 4 次成功的体内试验, 验证了新机器人系统的可行性和有效性。

3 血管介入机器人系统的临床应用

相比于传统介入操作,血管介入机器人介入操作明显具有更高的精度和稳定性,同时可减少操作人员相应X射线暴露水平,为手术者提供了良好的导航指引和操作平台,减轻了操作者负担和职业风险,因此也逐步应用于临床。

血管介入机器人的临床使用最先应用于冠状动脉系统。2005年Beyar等^[9]运用机器人辅助远程操作的冠状动脉介入手术操作系统,所有18例患者均达到了临床成功标准,有1例患者在3周后出现了非目标血管的心肌梗死,有2例因为支架覆盖不完全和远端夹层,额外补救支架。2010年Bismuth等^[16]运用HansenVCC系统在20例患者导管定位导航均取得成功,仅有1例因为脱管导致了穿刺处血肿,但之后未发生其他手术并发症。Corindus公司设计的Corpath200系统于2010年引入临床并成为目前唯一可用于冠状动脉介入治疗机器人辅助技术的系统^[27-28],并于2012年获得FDA批准。新一代的CorPath GRX系统在提高操控精细性的同时增加机器人操控的多样性,提高其在复杂病变的成功率,在包含了77.3%复杂病变的受试者中,手术的成功率达到了90%^[29],此后,Mahmud等^[30]通过机器人辅助经皮冠状动脉介入治疗(complex robotically assisted percutaneous coronary intervention, CORA-PCI)研究进一步证明了CorPath GRX在冠状动脉介入治疗中的可行性、安全性和高技术成功率。葛均波院士团队^[31]2021年运用CorPath GRX介入手术机器人完成国内首例机器人辅助下冠状动脉介入治疗手术,导丝迅速通过复杂病变,待球囊预扩后释放支架精确覆盖病变。

血管介入机器人系统在血管外科领域的应用同样十分广泛。复杂型胸腹主动脉瘤的腔内治疗因其技术要求高,手术时间长以及术者射线暴露时间长等缺点一直以来得不到广泛开展。尽管各种定制支架及开窗技术或平行支架技术等被逐渐应用于胸腹主动脉瘤中内脏动脉的重建,但对于解剖条件复杂或入路明显扭曲的患者来说超选至靶血管仍然具有一定的挑战性,传统的预成型导管由于其活动度有限在某些严重扭曲的血管中往往需要术者具有对导管导丝高超的把控能力,尤其在靶血管中通过硬导丝及支架过程中。Riga等^[32]通过应用Sensei机器人辅助系统(Hansen Medical,

Mountain View, Calif)通过主从机械作用来控制导管导丝从而在主动脉模型上完成对四分支血管的重建,结果表明机器人控制导管系统能很好地克服传统导管技术的弊端,增加靶血管的通过率,并能明显减少术者辐射暴露时间。并分别于2009年及2012年完成了1例接受机器人辅助的腹主动脉瘤腔内修复术(endovascular aneurysm repair, EVAR)案例以及1例肾动脉开窗辅助EVAR术,且无术后并发症^[8, 33]。此外,机器人辅助操控导管系统在严重扭曲的髂动脉病变中导管的引入及操控性方面具有独特的优势^[34]。通过伺服电机的牵引能够给遥控导管提供持续性的张力,其具有定位准确及支撑力强的特点,并被成功应用于1例III型胸腹主动脉瘤腔内隔绝术后肾动脉支架折叠的重建^[35]。

主动脉弓部病变腔内治疗中经常会碰到血栓脱落致脑梗等问题,过多的弓上血管内导管导丝操作及复杂主动脉弓解剖条件是其主要原因,因此主动弓上血管内导管导丝把控的准确性和稳定性至关重要^[36]。创新的机器人辅助遥控导管系统能在缩短手术时间、降低远端栓塞风险、减少导管移位及辐射暴露等方面取得不错的成绩^[37]。在颈动脉及主动脉弓上分支超选方面具有一定的优势:遥控导管能够抵抗弓部血管内导管导丝操作时的后退阻力,维持导管的稳定性,导管头端的塑形利于快速准确超选入靶血管,减少过多弓上操作从而减少脑梗的发生;另一方面,远程操作除了减少术者的辐射暴露以外,手术时间的缩短及快速的靶血管进入也能最大程度减少患者的辐射暴露。在此基础上,Perera等^[38]首次运用Magellan腔内机器人系统与传统经手导管操作做对比,通过术中经颅多普勒检查对胸主动脉腔内修复术过程中脑栓塞的发生率进行研究,结果表明与传统经手导管操作相比,机器导管操作能明显降低术中脑栓塞的发生。其良好的操控性及稳定性以及较少程度地直接接触动脉硬化的主动脉弓是减少脑栓塞的关键。同样有望应用于体外开窗EVAR技术中内脏动脉重建过程中减少栓塞的发生。

4 血管介入机器人系统的优点与不足

血管介入机器人系统虽然具有明显减少操作

者X射线暴露、成像定位精准、操作准确稳定的优点,在减少器械与血管壁接触、操作颤抖的同时,增加操作者舒适感^[17,39]。但是目前仍有许多因素限制了血管介入机器人系统的广泛使用。

首先,大多数系统的力反馈仅限于导管尖端与组织接触力反馈,仍缺乏对整个介入器械在血管内的力反馈功能,且很少有专用的力传感器可以直接测量手术导管受到的阻力信息,多数的研究中都是用力传感器间接地测量手术导管的受力情况,这样不可避免影响操作的安全性。触觉反馈缺失同样为术中误损伤血管和止血带来了挑战^[40],而且术中可能出现的机械故障会导致中转开放手术。

其次,血管介入手术需要大量不同规格型号的导丝导管、支架及辅助装置,在手术过程中无法做到像人手操作那样能快速交换导丝导管;尤其是不能像人手操作那样同时操控导管导丝及实时完成支架释放过程等。频繁更换器械及重复操作会对血管产生损伤,造成血栓、栓塞、夹层,甚至血管破损,同时也增加了患者射线暴露时间以及造影剂使用剂量^[41]。

最后,高昂的系统费用及年维修保养费用是阻碍其广泛推广的主要因素,同时标准操作者的培养及训练体系的不成熟也导致相应技术仅限于部分大的中心。

5 展 望

随着信息科学和生命科学的飞速发展以及学科间的交互渗透,血管介入手术机器人的发展使得血管介入手术更趋于精确和微创,为医疗外科技术的发展开辟了一个崭新的领域。血管介入手术机器人不仅在手术精确定位、手术最小创伤、手术质量等方面将带来一系列的技术变革,还会对新一代介入手术设备的开发与研制产生深远的影响。未来可以通过技术优化来增加触觉力觉反馈、多器械操作等更多的模块来完成更加复杂的病变。同时磁共振、光学相干断层扫描、血管内超声显像等影像学技术可用来发展兼容导管技术从而促进血管介入机器人系统的进展。5G技术的发展,从端与控制端之间信息传递速度提升,提高了远程手术的可靠性。虚拟现实技术可在三维可视化模型上反复多次对病变进行虚拟处理,提

高病变处理的准确性,进而选择出对患者更加适合的手术方式^[42]。除此之外,在未来仍需要更多研究去改善目前血管介入机器人系统存在的不足之处,而且制定适应证和禁忌证,建立标准程序,并通过大量临床试验来评估血管介入机器人系统的长期疗效,使得这项技术能够得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 《心肺血管病杂志》编辑部. 中国心血管健康与疾病报告2019[J]. 心肺血管病杂志, 2020, 39(9): 1145-1156. doi: 10.3969/j.issn.1007-5062.2020.09.028. Editorial Department of Journal of Cardiovascular and Pulmonary Diseases. Annual report on cardiovascular health and diseases in China 2019[J]. Journal of Cardiovascular and Pulmonary Diseases, 2020, 39(9): 1145-1156. doi: 10.3969/j.issn.1007-5062.2020.09.028.
- [2] 国家心血管病专业质控中心专家委员会血管外科专家工作组. 腹主动脉腔内修复手术质量评价指标体系的中国专家共识[J]. 中国普通外科杂志, 2018, 27(6): 669-673. doi: 10.3978/j.issn.1005-6947.2018.06.001. Working Group on Vascular Surgery, National Center for Cardiovascular Quality Improvement (NCCQI). Chinese experts' consensus on the evaluation index system of endovascular abdominal aortic aneurysm repair[J]. Chinese Journal of General Surgery, 2018, 27(6): 669-673. doi: 10.3978/j.issn.1005-6947.2018.06.001.
- [3] Karatasakis A, Brilakis HS, Danek BA, et al. Radiation-associated lens changes in the cardiac catheterization laboratory: Results from the IC-CATARACT (CATaracts Attributed to RAdiation in the CaTh lab) study[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2018, 91(4): 647-654. doi: 10.1002/ccd.27173.
- [4] Casella M, Dello Russo A, Russo E, et al. X-Ray Exposure in Cardiac Electrophysiology: A Retrospective Analysis in 8150 Patients Over 7 Years of Activity in a Modern, Large-Volume Laboratory[J]. J Am Heart Assoc, 2018, 7(11): e008233. doi: 10.1161/JAHA.117.008233.
- [5] Linet MS, Kim KP, Miller DL, et al. Historical review of occupational exposures and cancer risks in medical radiation workers[J]. Radiat Res, 2010, 174(6): 793-808. doi: 10.1667/RR2014.1.
- [6] 陈政, 沈毓, 陆清声. 机器人辅助血管介入治疗研究进展[J]. 介入放射学杂志, 2018, 27(1): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1008-794X.2018.01.001.

- Chen Z, Shen Y, Lu QS. Research progress in robot-assisted vascular interventional therapy[J]. *Journal of Interventional Radiology*, 2018, 27(1):1-4. doi:10.3969/j.issn.1008-794X.2018.01.001.
- [7] Faddis MN, Blume W, Finney J, et al. Novel, magnetically guided catheter for endocardial mapping and radiofrequency catheter ablation[J]. *Circulation*, 2002, 106(23):2980-2985. doi:10.1161/01.cir.0000038704.84304.6f.
- [8] Riga C, Bicknell C, Cheshire N, et al. Initial clinical application of a robotically steerable catheter system in endovascular aneurysm repair[J]. *J Endovasc Ther*, 2009, 16(2):149-153. doi:10.1583/08-2651.1.
- [9] Beyar R, Gruberg L, Deleanu D, et al. Remote-control percutaneous coronary interventions: concept, validation, and first-in-humans pilot clinical trial[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2006, 47(2):296-300. doi:10.1016/j.jacc.2005.09.024.
- [10] Guo S, Song Y, Yin X, et al. A novel robot-assisted endovascular catheterization system with haptic force feedback[J]. *IEEE Trans Robot*, 2019, 35(3):685-696. doi:10.1109/TRO.2019.2896763.
- [11] Yin X, Guo S, Song Y. Magnetorheological fluids actuated haptic-based teleoperated catheter operating system[J]. *Micromachines (Basel)*, 2018, 9(9):465. doi:10.3390/mi9090465.
- [12] Song Y, Guo S, Yin X, et al. Performance evaluation of a robot assisted catheter operating system with haptic feedback[J]. *Biomed Microdevices*, 2018, 20(2):50. doi:10.1007/s10544-018-0294-4.
- [13] Ernst S, Ouyang FF, Linder C, et al. Initial experience with remote catheter ablation using a novel magnetic navigation system: magnetic remote catheter ablation[J]. *Circulation*, 2004, 109(12):1472-1475. doi:10.1161/01.CIR.0000125126.83579.1B.
- [14] Mung JC, Huang SG, Moos JM, et al. Stereotactic endovascular aortic navigation with a novel ultrasonic-based three-dimensional localization system[J]. *J Vasc Surg*, 2013, 57(6):1637-1644. doi:10.1016/j.jvs.2012.09.078.
- [15] Mung J, Han S, Yen JT. Design and in vitro evaluation of a real time catheter localization system using time of flight measurements from seven 3.5 MHz single element ultrasound transducers towards abdominal aortic aneurysm procedures[J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(6):768-775. doi:10.1016/j.ultras.2011.03.005.
- [16] Bismuth J, Duran C, Stankovic M, et al. A first-in-man study of the role of flexible robotics in overcoming navigation challenges in the iliofemoral arteries[J]. *J Vasc Surg*, 2013, 57(2 Suppl):14S-9S. doi:10.1016/j.jvs.2012.08.124.
- [17] Au S, Ko K, Tsang J, et al. Robotic endovascular surgery[J]. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*, 2014, 22(1):110-114. doi:10.1177/0218492313484736.
- [18] 徐武夷, 卢旺盛, 刘达, 等. 血管介入机器人临床应用报告[J]. *中国血管外科杂志:电子版*, 2014, 6(1):16-18.
- Xu WY, Lu WS, Liu D, et al. Clinical application of vascular interventional robot[J]. *Chinese Journal of Vascular Surgery: Electronic Version*, 2014, 6(1):16-18.
- [19] 刘海洋. 血管介入手术机器人机构设计与主从控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2018.
- Liu HY. Research on mechanism design and master-slave control of vascular interventional surgical robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [20] Bao X, Guo S, Xiao N, et al. A cooperation of catheters and guidewires-based novel remote-controlled vascular interventional robot[J]. *Biomed Microdevices*, 2018, 20(1):20. doi:10.1007/s10544-018-0261-0.
- [21] 陈政, 沈毓, 陆清声, 等. 新型血管介入机器人应用可行性初探[J]. *介入放射学杂志*, 2018, 27(7):651-654. doi:10.3969/j.issn.1008-794X.2018.07.011.
- Chen Z, Shen Y, Lu QS, et al. The application of a newly-developed vascular intervention robot: preliminary study of its feasibility[J]. *Journal of Interventional Radiology*, 2018, 27(7):651-654. doi:10.3969/j.issn.1008-794X.2018.07.011.
- [22] 沈毓, 夏士博, 陈燕青, 等. 新型通用型血管腔内介入手术机器人成功实现外周血管支架成形术[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2020, 1(4):236-242. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2020.04.002.
- Shen Y, Xia SB, Chen YQ, et al. A novel universal endovascular interventional robot for peripheral arterial stent-assisted angioplasty [J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2020, 1(4):236-242. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2020.04.002.
- [23] 王坤东, 陆清声, 陈冰, 等. 血管介入手术机器人的临床设计及技术实现[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2020, 1(4):243-249. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2020.04.003.
- Wang KD, Lu QS, Chen B, et al. Design and technical realization of endovascular intervention robot in clinical practice [J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2020, 1(4):243-249. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2020.04.003.
- [24] Zhao Y, Guo S, Wang Y, et al. A CNN-based prototype method of unstructured surgical state perception and navigation for an endovascular surgery robot[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2019, 57(9):1875-1887. doi:10.1007/s11517-019-02002-0.
- [25] Wang K, Lu Q, Chen B, et al. Endovascular intervention robot with multi-manipulators for surgical procedures: Dexterity, adaptability, and practicability[J]. *Robot Cim-Int Manuf*, 2019, 56:75-84. doi:10.1016/j.rcim.2018.09.004.
- [26] Shen H, Wang C, Xie L, et al. A novel robotic system for vascular intervention: principles, performances, and applications[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2019, 14(4):671-683. doi:10.1007/s11548-018-01906-w.

- [27] Weisz G, Metzger DC, Caputo RP, et al. Safety and feasibility of robotic percutaneous coronary intervention: PRECISE (Percutaneous Robotically-Enhanced Coronary Intervention) Study[J]. J Am Coll Cardiol, 2013, 61(15): 1596-1600. doi: 10.1016/j.jacc.2012.12.045.
- [28] Granada JF, Delgado JA, Uribe MP, et al. First-in-human evaluation of a novel robotic-assisted coronary angioplasty system[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2011, 4(4): 460-465. doi: 10.1016/j.jcin.2010.12.007.
- [29] Smitson CC, Ang L, Pourdjabbar A, et al. Safety and feasibility of a novel, second-generation robotic-assisted system for percutaneous coronary intervention: first-in-human report[J]. J Invasive Cardiol, 2018, 30(4):152-156.
- [30] Mahmud E, Naghi J, Ang L, et al. Demonstration of the safety and feasibility of robotically assisted percutaneous coronary intervention in complex coronary lesions: results of the CORA PCI study (complex robotically assisted percutaneous coronary intervention) [J]. JACC Cardiovasc Interv, 2017, 10(13): 1320-1327. doi: 10.1016/j.jcin.2017.03.050.
- [31] 李晨光, 陆浩, 常书福, 等. CorPath GRX 机器人辅助冠状动脉介入治疗手术一例并文献回顾[J]. 中华心血管病杂志: 网络版, 2021, 4(1):1-7. doi:10.3760/cma.j.cn116031.2021.1000093. Li CG, Lu H, Chang SF, et al. CorPath GRX robotic interventional system for percutaneous coronary intervention: a case report and literature review[J]. Chinese Journal of Cardiology : Online Edition, 2021, 4(1): 1-7. doi: 10.3760/cma. j. cn116031.2021.1000093.
- [32] Riga CV, Cheshire NJ, Hamady MS, et al. The role of robotic endovascular catheters in fenestrated stent grafting[J]. J Vasc Surg, 2010, 51(4):810-819. doi: 10.1016/j.jvs.2009.08.101.
- [33] Riga CV, Bicknell CD, Rolls A, et al. Robot-assisted fenestrated endovascular aneurysm repair (FEVAR) using the Magellan system[J]. J Vasc Interv Radiol, 2013, 24(2):191-196. doi: 10.1016/j.jvir.2012.10.006.
- [34] Riga CV, Bicknell CD, Hamady M, et al. Tortuous iliac systems--a significant burden to conventional cannulation in the visceral segment: is there a role for robotic catheter technology?[J]. J Vasc Interv Radiol, 2012, 23(10): 1369-1375. doi: 10.1016/j.jvir.2012.07.006.
- [35] Carrell T, Dastur N, Salter R, et al. Use of a remotely steerable "robotic" catheter in a branched endovascular aortic graft[J]. J Vasc Surg, 2012, 55(1):223-225. doi: 10.1016/j.jvs.2011.07.032.
- [36] 舒畅, 李鑫, 李全明, 等. 支架自显影定位法体外开窗技术在主动脉弓部腔内修复术中的应用:附 113 例国际多中心病例回顾性分析[J]. 中国普通外科杂志, 2020, 29(12):1426-1434. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2020.12.003.
- Shu C, Li X, Li QM, et al. Application of self-radiopaque markers guiding physician-modified fenestration in aortic arch endovascular repair: an international multi-center retrospective analysis of 113 cases[J]. Chinese Journal of General Surgery, 2020, 29(12):1426-1434. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2020.12.003.
- [37] Riga CV, Bicknell CD, Hamady MS, et al. Evaluation of robotic endovascular catheters for arch vessel cannulation[J]. J Vasc Surg, 2011, 54(3):799-809. doi: 10.1016/j.jvs.2011.03.218.
- [38] Perera AH, Riga CV, Monzon L, et al. Robotic Arch Catheter Placement Reduces Cerebral Embolization During Thoracic Endovascular Aortic Repair (TEVAR) [J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2017, 53(3):362-369. doi: 10.1016/j.ejvs.2016.10.017.
- [39] Li MM, Hamady MS, Bicknell CD, et al. Flexible robotic catheters in the visceral segment of the aorta: advantages and limitations[J]. J Cardiovasc Surg (Torino), 2018, 59(3): 317-321. doi: 10.23736/S0021-9509.18.10458-7.
- [40] Bao X, Guo S, Xiao N, et al. Operation evaluation in-human of a novel remote-controlled vascular interventional robot[J]. Biomed Microdevices, 2018, 20(2):34. doi: 10.1007/s10544-018-0277-5.
- [41] Legeza P, Britz GW, Shah A, et al. Impact of network performance on remote robotic-assisted endovascular interventions in porcine model[J]. J Robot Surg, 2021, doi: 10.1007/s11701-021-01196-6. [Online ahead of print]
- [42] 白军军, 李航, 孙宝震, 等. 数字化三维重建技术在肝癌精准肝切除术中的应用[J]. 中国普通外科杂志, 2018, 27(7):826-833. doi: 10.3978/j.issn.1005-6947.2018.07.005.
- Bai JJ, Li H, Sun BZ, et al. Application of digital3D reconstruction technique in precise hepatectomy for liver cancer[J]. Chinese Journal of General Surgery, 2018, 27(7): 826-833. doi: 10.3978/j.issn.1005-6947.2018.07.005.

(本文编辑 宋涛)

本文引用格式:何昊, 叶子健, 舒畅. 血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状[J]. 中国普通外科杂志, 2021, 30(12):1477-1484. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012

Cite this article as:He H, Ye ZJ, Shu C. Essential techniques and current research situation in robotic endovascular systems[J]. Chin J Gen Surg, 2021, 30(12): 1477-1484. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012