

· 专 论 Special comment ·

X 线透视下血管腔内介入手术器具自动识别与跟踪研究进展

徐亚琪, 陆清声

【摘要】 血管腔内介入手术器具自动识别与跟踪有利于血管疾病精准智能微创诊治及手术机器人自动化。随着人工智能(AI)不断发展,识别与跟踪技术的准确率和实时性也在不断提高,更加适应临床需求。本文综述了 X 线透视下血管腔内介入手术器具自动识别与跟踪研究进展。首先,总结和阐述了介入手术器具自动识别与跟踪相关技术;其次,从完全监督和弱监督两个角度总结了介入手术器具识别与跟踪算法;最后,对介入手术器具识别与跟踪技术应用场景进行了较为全面的总结,包括手术辅助决策、手术智能导航和手术增强现实(AR)技术培训。

【关键词】 血管腔内手术; X 线透视; 识别与跟踪; 自动化; 手术器具

中图分类号:R612 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2024)-07-0699-05

Research progress in the automatic identification and tracking of surgical instruments for endovascular intervention under X-ray fluoroscopy XU Yaqi, LU Qingsheng. *Department of Vascular Surgery, First Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200433, China*

Corresponding author: LU Qingsheng, E-mail: luqs@newvascular.cn

【Abstract】 The automatic identification and tracking of surgical instruments for endovascular interventions is beneficial for precise, intelligent, minimally-invasive diagnosis and treatment of vascular diseases as well as for the automation of surgical robots. With the continuous development of artificial intelligence (AI), the accuracy and real-time performance of identification and tracking technology have also been constantly improved, which can better meet the clinical requirements. This article reviews the research progress in the automatic identification and tracking of surgical instruments for endovascular interventions under X-ray fluoroscopy. The content of this article mainly includes the following three aspects: (1) summarizing and describing the relevant techniques of automatic identification and tracking of interventional surgical instruments; (2) summarizing the identification and tracking algorithms of interventional surgical instruments from the perspectives of complete supervision and weak supervision; and (3) comprehensively summarizing the application scope of the technology of automatic identification and tracking of interventional surgical instruments, including surgical assistance decision-making, surgical intelligent navigation and surgical augmented reality (AR) technology training. (J Intervent Radiol, 2024, 33: 699-703)

【Key words】 endovascular surgery; X-ray fluoroscopy; identification and tracking; automation; surgical instrument

血管腔内介入手术能够实现对血管性疾病微创治疗。然而在实际临床应用中,介入手术器具位置与空间姿态变化复杂,难以精确识别与定位。狭窄的手术视野和操作空间限制了医师手眼协调能

力^[1]。为了解决这些问题,识别与跟踪技术应运而生。利用先进的影像处理和实时定位技术,能够实时准确地识别与跟踪血管腔内介入手术器具,为医师提供精准导航和操作信息,从而大大提高手术安

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2024.07.001

基金项目:上海市科委科技计划项目(23XD1405000)

作者单位:200433 上海 海军军医大学第一附属医院血管外科(徐亚琪、陆清声);上海理工大学健康科学与工程学院(徐亚琪)

通信作者:陆清声 E-mail: luqs@newvascular.cn

全性和成功率。准确判断介入器具与血管内壁相对位置和距离能够帮助医师更安全地开展手术操作,避免损伤血管内壁和周围组织。随着计算机视觉技术不断发展,未来识别与跟踪技术在血管腔内介入手术中应用将会越来越广泛,为患者带来更好的治疗效果^[2]。本文详细介绍当前 X 线透视下血管腔内介入手术器具识别与跟踪研究进展,分析技术革新及存在的挑战,并展望未来可能的研究方向。

1 介入手术器具自动识别

1.1 感应识别

感应式识别主要采取非接触方式,通过各类传感器获取介入手术器具所反馈的信号,经数据处理和算法分析可以计算出其姿态信息和空间位置。Han 等^[3]提出了一种利用多芯光纤形状传感方法精确感知导丝、导管形状的解决方案。该方案将多芯光纤传感器嵌入至导管,通过温度补偿方法避免温度变化对多芯光纤布拉格光栅(fiber bragg grating,FBG)波长产生影响。与粒子群优化算法(particle swarm optimization,PSO)相结合,进一步减少了导管形状传感误差。在 Mung 等^[4]研究中,将导管尖端装置超声发射器,外部传感器可以感知超声发射器传播的超声能量,从而可以识别出导管尖端并确定其在血管内位置。感应识别需要外部硬件支持,会增加介入手术成本。其实时性也无法满足介入手术要求。

1.2 视觉识别

相比于感应识别,视觉识别无需对导丝、导管等介入手术器具进行特殊改装。视觉识别主要利用人工智能(artificial intelligence,AI)视觉算法识别影像中介入手术器具。Zhou 等^[5]提出了一种基于电缆驱动的并联机制 X-CADPAM 概念的 CathPilot 系统,该系统能够使其工作空间与 X 线平面相垂直。与 X 线透视技术提供的 2D 信息相结合,CathPilot 系统实现以 3D 形式可视化解剖组织结构。同时,该系统能够以亚毫米级精度对血管腔内介入器具进行实时识别。为了提高识别实时性和准确性,目前主要采取基于 YOLO(you only look once)算法的识别方法^[6]。在 Jiang 等^[7]研究中,利用 YOLOv3 识别出金属支架,其识别精度和召回率均在 95%以上,识别速度同时也满足了实时性要求。丰蕊等^[8]利用 YOLOX 目标检测模型识别出 DSA 中各类型导丝、导管及长鞘等血管介入手术器具,其平均识别准确率可达 97.75%。未来随着 YOLO 算法性能不断提升,其实时性将满足临床需求。此为未来自动识别

的主要研究方向。

2 介入手术器具跟踪

2.1 光学跟踪

光学跟踪利用光学传感器和光学成像技术实现对介入手术器具的精确定位与跟踪,从而为医师开展手术操作提供方向引导^[9]。根据跟踪过程中是否需要主动发出光源,可划分为主动式跟踪与被动式跟踪。在 Zhou 等^[10]研究中,将立体视觉原理应用于光学跟踪系统。该系统利用图像处理方法和 3D 空间跟踪算法可以推导出手术器具 3D 坐标,从而实现定位与跟踪。van Herwaarden 等^[11]首次提出,使用支持光纤 RealShape(fiber optic RealShape,FORS)技术的设备能够在主动脉和外周血管内手术中实现实时导航,并通过人体临床实践验证这一方法的可行性。利用 FORS 技术可以实时 3D 显示血管内支持 FORS 的导丝或导管,且以彩色表示,有效地提高了医师手术视野。未来可与 X 线透视系统相结合,创建动脉血管 3D 解剖图像叠加有利于辅助手术导航^[12]。然而,在手术过程中,手术器具会出现被遮挡情况,光学跟踪无法对其准确跟踪。

2.2 电磁跟踪

电磁跟踪主要基于磁场定位原理,通过在手术区域附近设置一个磁场,与介入手术器具的磁性标记相互作用,实现对介入手术器具精确定位和跟踪。其包括场发生器、电磁发生器和集成跟踪模块 3 个核心组件^[13]。Schwein 等^[14]将电磁传感器装置于柔性机器人导管尖端,电磁跟踪系统能够在已知几何形状的电磁场中定位电磁传感器。基于上述原理,可以在 3D 磁场坐标系中实现精确定位导管尖端,有效减少透视时间。在 Nypan 等^[15]猪模型动物实验研究中,验证了电磁跟踪具备与图像融合相似的导航性能。为了提高介入手术器具形状定位精确性,Jackle 等^[16]提出了一种结合基于 FBG 形状传感与电磁跟踪的解决方案。在支架移植系统中,该方案可以获得被跟踪支架移植位置信息与形状信息。但在实际临床应用中,手术室中手术床电机、手术器具等医疗设备产生的磁场对电磁跟踪系统会造成很大干扰,且手术成本相对高昂。

2.3 影像跟踪

基于影像的跟踪系统结合 X 线、CT 或 MRI 等生成的单一模态影像各自优势,利用多模态图像配准与融合,在 3D 空间内精准定位导丝、导管等介入手术器具位置,从而实现跟踪^[17]。相比于单模态影像,多模态影像能够在手术过程中提供空间立体信

息,为医师提供更广阔的手术视野。Abi-Jaoudeh 等^[18]利用基于锥形束 CT 影像融合导航技术跟踪导管,且可以减少透视时间。在 Guan 等^[19]研究中,利用多模态影像融合导航系统跟踪介入手术器具,且配准精度和定位精度均在 1 mm 以下。该导航系统结合术前 CTA 与术中 2D DSA 信息,利用 2D-3D 图像配准技术获得不同影像各自优点。随着深度学习相关算法不断优化,未来跟踪精度和实时性将进一步提高。综上,影像跟踪是未来血管腔内介入手术器具跟踪的主要研究方向。

3 介入手术器具识别与跟踪算法

3.1 基于完全监督深度学习

随着计算机视觉技术发展,卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)等基于完全监督深度学习模型广泛应用于 X 线透视图像处理中^[20]。适当深度神经网络层数与经典算法相结合,更加有利于识别与跟踪介入器具。基于其优秀的影像处理和深度学习能力, CNN 可以自动学习和识别血管腔内介入器具^[21]。训练中将带有标记的血管腔内影像引入模型训练, CNN 能够找到影像中与介入器具相关特征,从而可以实现对介入器具精确识别。凭借连续的血管腔内图像序列, CNN 可以用来对下一时刻介入器具位置和空间姿态进行预测,从而可以实现实时跟踪介入器具。

Ullah 等^[22]提出了一种图像分析跟踪方法,该方法基于深度 CNN,能够在连续的局部帧上对导丝机器人尖端进行实时识别与跟踪。未来也有望用于血管腔内手术机器人中,实现对 X 线图像中导丝等介入器具自动跟踪。Ravigopal 等^[23]利用轻量级 CNN MobileNetV2 语义分割架构实时跟踪 C 臂透视下导丝形状及其工作姿态。其跟踪准确率可以达到 90%,执行时间也满足实时跟踪要求。在 Ghosh 等^[24]研究中,利用拓扑感知几何深度学习网络在脑血管造影中对各类导管进行自动分割和尖端检测。然而,在血管腔内介入手术器具检测与跟踪应用方面,基于完全监督深度学习也面临一些挑战。血管腔内图像通常存在低对比度、噪声干扰以及器具交叠等问题,这些问题会对深度学习性能产生影响。腔内介入器具形变和位置处在不断动态变化中,对实时检测与跟踪的准确性也带来了一定难度。此外,完全监督深度学习依赖于大量标注数据,而数据标注工作繁琐且耗时。

3.2 基于弱监督深度学习

传统的完全监督模型采用人工完全标注数据

进行训练,该方法极大地限制了可用数据集的大小和介入手术器具识别与跟踪算法的泛化能力^[25]。相比于完全监督深度学习模型,基于弱监督深度学习模型在训练血管腔内介入手术图像数据时只需要训练图像级别标注数据,在空间上无需任何标注,可以有效降低人工标注工作量及非专业人工标注可能存在的误差^[26]。介入器具识别与检测在弱监督学习下可以视为同一种任务。其输入均需要有一定的监督,对目标检测是基于目标定位算法所获得的器具位置,并在此基础上训练完全监督目标检测器。其学习过程也决定了弱监督下目标检测与定位中目标位置的准确性。

Zhang 等^[27]提出了一种新型基于注释精化的自定进度学习(annotation-refining self-paced learning, AR-SPL)框架。该框架可以自主地从生成的嘈杂伪标签中学习,并通过实验验证其具有与完全监督深度学习相似的分割精度。由于不需要大量注释成本,未来可在肾动脉狭窄检测的分割方面得到广泛应用。Yang 等^[28]为了实现在 3D 体积数据中定位器具,提出基于弱监督学习方法。该方法通过对导管自动化分割,可以有效避免体系级注释。Meng 等^[29]提出了一种基于弱监督的血管配准框架,该框架可以实现对 DSA 的影像进行弱监督自动调整,从而对血管腔内介入器具精确识别与跟踪也起到促进作用。目前,弱监督发展还不成熟,还未实现对血管腔内介入器具实时检测与跟踪。其标注缺乏准确性,会降低算法性能。此外,在实际临床中血管腔内介入手术器具姿态处在不断变化之中,弱监督学习算法无法准确捕捉到其运动轨迹。

4 应用场景

4.1 手术辅助决策

血管介入手术需要团队密切协作,手术安全与医师决策息息相关。手术辅助决策的应用有效避免了传统医助间配合存在不默契的弊端,同时奠定了介入手术术中人机协同行为决策的基础^[30]。视觉识别技术在手术影像中对目标器具实时识别与跟踪,能够有效辅助医师进行手术,并根据影像信息使医师作出关键的术中决策。识别技术提供手术区域详细的可视化信息,医师可以清晰地看到介入手术器具在患者血管解剖结构中的位置^[31]。准确判断器具与目标组织相对位置和距离,有助于准确地定位手术目标。跟踪技术实时监测介入器具位置和运动轨迹,为医师提供了实时导航信息^[32]。在手术过程中,医师可以根据介入器具的准确位置开展手术动作。

同时,通过实时跟踪和定位,医师可以及时调整手术策略,应对手术中突发情况。未来可与弱监督学习方法相结合,不断创新识别与跟踪技术,使其可以实现在简单血管分叉道路中自主决策,更加快速精准地进行操作,缩短手术时间。

4.2 手术智能导航

传统介入手术中,医师是凭借经验开展手术操作。介入手术器具识别与跟踪技术发展,使介入手术导航更加可视化 and 智能化^[33]。术前,利用深度学习算法可以对 CT、DSA 等医学成像进行自动分割、标记和识别,以提取出重要的解剖结构和病变区域,提取的解剖结构和病变区域与患者实际解剖情况进行对齐,精准定位病灶及周围血管等组织关系;术中,利用识别与跟踪技术获取患者病灶和介入手术器具位置和运动轨迹信息,将这些信息与预先分析的医学影像通过 3D/2D 配准技术进行配准,以实现实时手术导航,辅助医师有效地展开手术操作^[34]。未来随着 AI 发展,识别与跟踪技术将应用于手术机器人。结合术前自动规划的导航路径,术中机器人自动识别 X 线透视下血管腔内介入器具,实时动态追踪显示导丝、导管等介入手术器具到病灶的路径、距离、角度等,全程监控定位,实现自动智能导航。在软件控制下机器人可以对血管腔内介入手术器具进行自动操作,从而实现手术机器人独立完成外科手术。

4.3 手术增强现实技术培训

随着数字医学时代的到来,识别与跟踪技术在医学教育和介入手术增强现实(augmented reality, AR)技术培训领域发挥越来越重要的作用^[35]。与血管介入手术相结合,可以实现对血管介入过程进行模拟介入培训和规划训练。相比于传统手术培训的高试错成本,基于 AR 的手术培训提供了一种全新灵活的手术培训模式,可以帮助实习医师更好地掌握介入手术技术,提高手术操作准确性和安全性^[36]。首先,识别与跟踪技术提供了真实而安全的手术环境。实习医师可以在模拟手术环境中接触和操作真实介入器具,同时通过虚拟现实(virtual reality, VR)或 AR 技术设备实时观察介入手术器具在患者解剖结构中的位置、运动轨迹及与周围组织的关系。高度仿真的手术体验有助于培养他们手术操作技能和判断能力。其次,识别与跟踪技术能够对实习医师手术操作过程进行实时跟踪和定位,软件系统可以生成手术操作数据统计,并对操作过程中不足或错误进行指导和纠正。实时反馈机制有利于实习医师及时发现并改正自己的操作错误,促进其更快地

提升手术技能^[37]。

5 总结与展望

目前,血管介入手术机器人并非真正意义上的机器人,只是通过主从式用机器重复人的动作。其导航仍停留在手动化阶段。德国西门子医疗子公司 Corindus 公司研发了一款 GorPath 200 手术机器人,并于 2016 年获得美国食品药品监督管理局(FDA)批准,其新一代 CorPath GRX 可以实现外周血管介入,但其仅适用于特定的介入器具^[38]。法国 Robocath 公司研发了一款与 CorPath GRX 类似解决方案的 R-One 机器人经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)系统^[39]。该系统增加了导丝锁定技术和双导丝保留功能,其安全性得到有效验证^[40]。此外,陆清声、王学坤等合作研发了一款通用型血管腔内介入手术机器人^[41]。该手术机器人系统适用于市面上各类商品化导丝、导管等介入手术器具,且能够实现复杂动作的人机协同。

随着 AI 和机器学习技术快速发展,手术机器人不断朝着自主化、智能化方向发展^[42]。机器人在传感、算力等方面优势能够让手术流程数字化、标准化,在人机交互方面实现触觉、视觉交互反馈。未来,血管介入手术器具识别与跟踪技术应用于手术机器人,机器人能够更精准、更快速地识别与跟踪介入器具,有望实现术中自主导航和自主决策。

[参考文献]

- [1] 王 鉴,高 翔,张 峰,等. 血管介入机器人辅助介入治疗研究现状[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32:619-623.
- [2] 何梓君,孔 健. 人工智能在介入放射学中的运用前景及挑战[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32:1251-1255.
- [3] Han F, He Y, Zhu H, et al. A novel catheter shape-sensing method based on deep learning with a multi-core optical fiber[J]. Sensors, 2023, 23: 7243.
- [4] 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: 1637-1644.
- [5] Zhou JJ, Quadri A, Sewani A, et al. The CathPilot: a novel approach for accurate interventional device steering and tracking[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27: 5812-5823.
- [6] Ragab MG, Abdulkader SJ, MuneerA, et al. A comprehensive systematic review of YOLO for medical object detection(2018 to 2023)[J]. IEEE Access, 2023, 11:i-xxv.
- [7] Jiang X, Zeng Y, Xiao S, et al. Automatic detection of coronary metallic stent struts based on YOLOv3 and R-FCN[J]. Comput Math Methods Med, 2020, 2020: 1793517.
- [8] 丰 蕊,冯 浩,宋 超,等. YOLOX 目标检测模型用于自动

- 识别数字减影血管造影图中的血管腔内介入器械[J]. 中国介入影像与治疗学, 2024, 21:100-104.
- [9] Sorriento A, Porfido MB, Mazzoleni S, et al. Optical and electromagnetic tracking systems for biomedical applications: a critical review on potentialities and limitations[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2020, 13: 212-232.
- [10] Zhou Z, Wu B, Duan J, et al. Optical surgical instrument tracking system based on the principle of stereo vision[J]. J Biomed Opt, 2017, 22: 65005.
- [11] van Herwaarden JA, Jansen MM, Voncken EPA, et al. First in human clinical feasibility study of endovascular navigation with fiber optic RealShape(FORS) technology[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2021, 61: 317-325.
- [12] Jansen M, Khandige A, Kobeiter H, et al. Three dimensional visualisation of endovascular guidewires and catheters based on laser light instead of fluoroscopy with fiber optic RealShape technology: preclinical results[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2020, 60: 135-143.
- [13] Franz AM, Haidegger T, Birkfellner W, et al. Electromagnetic tracking in medicine: a review of technology, validation, and applications [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2014, 33: 1702-1725.
- [14] Schwein A, Kramer B, Durai PC, et al. Flexible robotics with electromagnetic tracking improve safety and efficiency during in vitro endovascular navigation[J]. J Vasc Surg, 2016, 63: 285-286.
- [15] Nypan E, Tangen GA, Brekken R, et al. A steerable and electromagnetically tracked catheter: navigation performance compared with image fusion in a swine model[J]. J Endovasc Ther, 2024, 31: 312-317.
- [16] Jackle S, Garcia-Vazquez V, Eixmann T, et al. Three-dimensional guidance including shape sensing of a stentgraft system for endovascular aneurysm repair[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2020, 15: 1033-1042.
- [17] 杨健, 王媛媛, 艾丹妮, 等. 多模态图像引导手术导航进展[J]. 光学学报, 2023, 43:17-35.
- [18] Abi-Jaoudeh N, Kruecker J, Kadoury S, et al. Multimodality image fusion-guided procedures: technique, accuracy, and applications [J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2012, 35: 986-998.
- [19] Guan S, Li T, Meng C, et al. Multi-mode information fusion navigation system for robot-assisted vascular interventional surgery[J]. BMC Surg, 2023, 23: 51.
- [20] Chadebecq F, Vasconcelos F, Mazomenos E, et al. Computer vision in the surgical operating room[J]. Vis Med, 2020, 36: 456-462.
- [21] Moccia S, Romeo L, Migliorelli L, et al. Supervised CNN strategies for optical image segmentation and classification in interventional medicine[M]. Deep learners and deep learner descriptors for medical applications, 2020: 213-236.
- [22] Ullah I, Chikontwe P, Park SH. Real-time tracking of guidewire robot Tips using deep convolutional neural networks on successive localized frames[J]. IEEE Access, 2019, 7: 159743-159753.
- [23] Ravigopal SR, Sarma A, Brumfiel TA, et al. Real-time pose tracking for a continuum guidewire robot under fluoroscopic imaging[J]. IEEE Trans Med Robot Bionics, 2023, 5: 230-241.
- [24] Ghosh R, Wong K, Zhang YJ, et al. Automated catheter segmentation and tip detection in cerebral angiography with topology-aware geometric deep learning[J]. J Neurointerv Surg, 2024, 16: 290-295.
- [25] Lee EJ, Plishker W, Liu X, et al. Weakly supervised segmentation for real-time surgical tool tracking[J]. Healthc Technol Lett, 2019, 6: 231-236.
- [26] Roth HR, Yang D, Xu Z, et al. Going to extremes: weakly supervised medical image segmentation[J]. Mach Learn Knowl Extr, 2021, 3: 507-524.
- [27] Zhang D, Han J, Cheng G, et al. Weakly supervised object localization and detection: a survey[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2022, 44: 5866-5885.
- [28] Yang H, Shan C, Kolen AF, et al. Weakly-supervised learning for catheter segmentation in 3D frustum ultrasound[J]. Comput Med Imaging Graph, 2022, 96: 102037.
- [29] Meng C, Li Y, Xu Y, et al. A weakly supervised framework for 2D/3D vascular registration oriented to incomplete 2D blood vessels[J]. IEEE Trans Med Robot Bionics, 2022, 4: 381-390.
- [30] 关沛峰, 温诗涵, 杨荣骞. 血管介入手术机器人的研究进展及前景分析[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47:638-644.
- [31] Shi P, Zhao Z, Hu S, et al. Real-time surgical tool detection in minimally invasive surgery based on attention-guided convolutional neural network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 228853-228862.
- [32] Qiu J, Ming J, Qian C, et al. Guidewire simulation of endovascular intervention: a systematic review[J]. Int J Med Robot, 2022, 18: e2444.
- [33] Chan HHL, Haerle SK, Daly MJ, et al. An integrated augmented reality surgical navigation platform using multi-modality imaging for guidance[J]. PLoS One, 2021, 16: e0250558.
- [34] Edstrom E, Burstrom G, Omar A, et al. Augmented reality surgical navigation in spine surgery to minimize staff radiation exposure[J]. Spine, 2020, 45: E45-E53.
- [35] 徐文博, 于洋, 王超. 介入治疗与教学的元宇宙: 今生与未来[J]. 中国医学教育, 2023, 37:397-401.
- [36] 刘书中, 吴昀效, 刘勇, 等. 混合现实技术在脊柱微创手术术前规划及教学培训中的应用现状及前景[J]. 中国骨与关节杂志, 2022, 11:461-464.
- [37] Al-Ebrahim EK, Madani T A, Al-ebrahim KE. Future of cardiac surgery, introducing the interventional surgeon[J]. J Card Surg, 2022, 37: 88-92.
- [38] Walters D, Omran J, Patel M, et al. Robotic-assisted percutaneous coronary intervention: concept, data, and clinical application[J]. Interv Cardiol Clin, 2019, 8: 149-159.
- [39] Najafi G, Kreiser K, Abdelaziz MEMK, et al. Current state of robotics in interventional radiology[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2023, 46: 549-561.
- [40] Durand E, Sabatier R, Smits PC, et al. Evaluation of the R-one robotic system for percutaneous coronary intervention: the R-EVOLUTION study[J]. EuroIntervention, 2023, 18: e1339-e1347.
- [41] 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, 1:243-249.
- [42] 吴志远, 程永德. 数字介入——当介入放射学遇上数字医学[J]. 介入放射学杂志, 2024, 33:1-6.

(收稿日期:2024-03-27)

(本文编辑:谷珂)