



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2023.12.013
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.2023.12.013
China Journal of General Surgery, 2023, 32(12):1936-1943.

· 文献综述 ·

血管介入手术机器人的腔内器械自动识别与跟踪研究进展

伍尚至^{1,2}, 陆清声¹

(1. 中国人民解放军海军军医大学附属长海医院 血管外科, 上海 200433; 2. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要

在血管外科领域, 血管介入手术是一种高效的微创治疗方法。然而, 传统的介入手术方法需要医生长时间穿戴防护铅衣, 并且存在暴露于辐射的风险, 这不仅为医生带来健康隐患, 还可能对手术效率产生不利影响。随着血管腔内介入手术机器人 (EIR) 的研发应用, 可在减少医生辐射暴露的同时, 提供相较于传统方法更高的操作精度和稳定性。介入器械的自动识别和实时跟踪两大关键技术可以使得 EIR 在复杂的介入手术中拥有对器械方位的把控能力和判断能力, 从而保证治疗的质量和安全性。目前研究大多倾向利用介入影像实现 EIR 在血管结构中实时、准确地检测和定位器械, 即令机器人观察图像信息进行手术。与此同时, 介入器械识别技术与 EIR 的协同工作具有重大潜在价值。这要求机器人不仅要能精准执行命令, 更需能够理解和预测医生的操作意图。随着人工智能技术的发展, 有望在辅助机器人更精确地识别和跟踪器械并修改定位误差方面提供支持, 实现真正的协同手术。在此, 笔者分析介入器械的自动识别和实时跟踪两大技术在 EIR 领域的应用情况, 综合讨论它们的临床应用前景, 并对国内外相关技术的发展进行对比和总结。

关键词

血管外科手术; 机器人手术; 诊断技术, 外科学; 综述
中图分类号: R654.3

Research progress on surgical instrument automatic recognition and tracking for endovascular interventional robotics

WU Shangzhi^{1,2}, LU Qingsheng¹

(1. Department of Vascular Surgery, Changhai Hospital, Naval Medical University, Shanghai 200433, China; 2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract

In the field of vascular surgery, vascular intervention surgery is an efficient minimally invasive treatment method. However, traditional intervention procedures require doctors to wear lead aprons for an extended period of time, and there is also a risk of radiation exposure. This not only poses health hazards for the medical professionals but also has the potential to adversely affect surgical efficiency. With the development and application of endovascular interventional robotics (EIR), it is possible to reduce doctor's radiation exposure while providing higher operational precision and stability over traditional

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2018AAA0102603); 上海市科技计划基金资助项目 (23XD1405000)。

收稿日期: 2023-08-14; 修订日期: 2023-11-02。

作者简介: 伍尚至, 上海理工大学健康科学与工程学院与中国人民解放军海军军医大学附属长海医院联合培养硕士研究生, 主要从事血管腔内介入手术机器人关键技术方面的研究。

通信作者: 陆清声, Email: luqs@newvascular.cn

methods. Two key technologies, automatic instrument recognition and real-time tracking, enable EIR to control and assess the orientation of instruments in complex intervention surgeries, ensuring the quality and safety of treatments. Current research predominantly focuses on using intervention imaging to enable EIR to accurately detect and locate instruments in blood vessels in real-time, essentially allowing the robot to perform surgery based on observed image information. Simultaneously, the collaborative work of instrument recognition technology with EIR have significant potential value. This requires robots not only to execute commands precisely but also to understand and predict the operator's intentions. The development of artificial intelligence technology, is expected to support robots in more accurately identifying and tracking instruments and correcting positioning errors, ultimately achieving true collaborative surgery. Here, the authors analyze the application of the two major technologies, automatic instrument recognition and real-time tracking, in the field of EIR, and comprehensively discuss their prospects for clinical applications, along with of the development of relevant technologies both domestically and abroad.

Key words

Vascular Surgical Procedures; Robotic Surgical Procedures; Diagnostic Techniques, Surgical; Review

CLC number: R654.3

2023年6月发布的《中国心血管健康与疾病报告2022》指出,推算我国心血管病现患人数约3.3亿,城乡居民疾病死亡构成比中,心血管病占首位,心血管病发病率仍处于持续上升阶段^[1]。作为心血管疾病治疗的治疗手段,血管腔内介入手术创伤较小、手术风险更低且效果显著,日益受到医界的青睐。但在实施此类手术时,医生必须高度依赖X射线,为此医生将会受到大量辐射危害。另外,医生需要操作柔性介入器械,如导丝、导管、支架及球囊等进行手术,这对医生在复杂的手术环境中的操作技巧提出了高要求^[2]。目前,血管腔内介入手术机器人(endovascular interventional robotics, EIR)作为先进的微创手术设备,因其可减少医师X射线暴露风险,并能在血管系统内稳定操作等优势已广泛应用于外周介入治疗手术、冠状动脉腔内治疗手术及心脏射频消融手术^[3]。但在手术过程中,介入器械的动态运动经常难以预测,尤其是在缺乏直接视觉的情况下。此外,对器械远端的操作可能导致腔内器械近端不移动、仅有有限扭曲或出现意外的大幅度反弹。由于摩擦、滑动、介入器械引起的血管腔道壁变形,远端与近端之间的手术动作往往不能达到理想的效果。为了在手术中做出准确决策,EIR需要充分感知手术环境和患者的状况,因此,赋予EIR对介入器械的“感知”能力显得尤为关键^[4]。介入器械的自动识别和实时跟踪技术被认为是目前最

可靠实现方法。使EIR具备对器械的实时识别和跟踪功能^[5],将成为EIR进入自动导航手术领域的关键。本综述旨在详细介绍当前腔内介入器械的自动识别与跟踪方法及其最新研究进展,其中包括基于反馈、混合技术和人工智能(artificial intelligence, AI)图像的自动识别技术,以及基于光学、电磁和影像的跟踪技术,并深入探讨其在EIR中的应用及所面临的挑战以及未来的发展趋势。

1 介入器械的自动识别

介入器械识别是指在医学影像中突出显示并定位术中介入器械的能力。借助这一自动化技术,EIR得以在连续或单一的医学影像中准确地识别并区别各种器械。尤其当应用于X线影像时,该技术可以对介入器械的近端和躯干进行高精度的视觉定位和可视化。

1.1 反馈式识别

在数字化医学影像技术普及之前,研究者通过改进器械材料和开发专门的识别设备来实现器械识别。根据其工作机制,分为主动识别和被动识别:(1)主动识别依赖于器械内部的反馈元件,由器械内部发出信号,然后被设备接收成像。Collins等^[6]通过导丝的压电元件与超声换能器,在超声图像中成功定位了导丝。光纤形状传感器也

称为光纤光栅 (fiber bragg grating, FBG) 传感器, 是一种特定光纤内的光波滤波传感器, 能够响应外部物理变化 (如应力或温度) 并据此测量相应的物理量。Chen 等^[7]利用 FBG 传感器设计了一款新型的形状传感导管, 但这种设计会在遭遇大弯曲时出现光谱失真^[8-9], 导致错过某些位置信息。也有利用磁场感应电磁传感器的原理, 达到识别的方法。Ramadani 等^[10]提出能直接获得器械姿态的离散点分布传感, 需多个电磁传感器保证位置精确度。(2) 被动识别则是外设设备发送信号, 由附于介入器械的元件接收信号达到识别的方法^[11]。Magnusson 等^[12]在导管上使用在磁场中可视化的化合物实现成像。Wegner 等^[13]利用磁粉成像技术, 能通过振荡磁场可视化磁性纳米颗粒, 使用磁颗粒波谱仪成像, 还解决了主动识别的能耗和散热问题。但为确保导管信号强度, 可能需增大其直径, 限制其在小血管中的应用, 影响了其在多种腔内手术中的使用^[14]。

1.2 视觉图像识别

数字成像技术进步带动了视觉图像识别在医学领域的发展。这项技术利用 AI 视觉算法在介入影像中直接识别器械, 省去对传统器械特殊改装的需求, 更便于融入常规手术流程。Useche Murillo 等^[15]在 2017 年的研究中, 用 Haar 算法分析器械外观进行识别。随着深度学习技术的崛起, 更多先进的 AI 算法被应用于 EIR 器械识别。卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 算法因其高准确度而受到广大研究者的关注。Li 等^[16]提出的算法不仅可以识别导丝, 还能实现精确定位, 尽管牺牲了部分速度, 但准确率达 90%。目标检测算法 (you only look once, YOLO) 注重识别速度, 适合术中实时识别, 它可以产生一个边所识别介入器械的矩形框边界, 用以指明其位置, 并展示识别出框内对象类别的概率。Song 等^[17]利用 YOLO 识别导管和导丝, 虽然识别速度达到肉眼识别要求, 但准确度略低。而对于特征明显的器械, 如冠脉支架, YOLO 表现出色, 准确率达 95%^[18]。执行 EIR 视觉图像器械识别, 需预先使用大量标记的手术图像进行有监督训练。未来无监督学习或免预制数据方法可能成主流^[19], Vlontzos 等^[20]用光流法 (一种通过分析图像亮度变化识别器械运动的方法) 成功对导管进行识别及追踪, 但该方法还未在三维导管重建和跟踪的背景下被评估。

1.3 混合模式识别

在 EIR 手术中, 提高手术的准确度与实时性至关重要。为了达到这一目标, 混合模式识别受到了广泛的关注。它不仅是单一技术的简单应用, 而是多种技术的融合, 旨在为器械定位提供最高的精确度。通过结合二维和三维图像信息的配准方法已被提出^[21-24], 这种方法整合了多视角图像与众多数据反馈, 提供比单独图像更为全面的信息。由于常规的二维影像缺少三维的深度信息, 此方法可以从三维图像中抽取导管的深度, 并清晰地二维影像上呈现, 从而为 EIR 提供了介入器械在血管中的完整三维定位信息。数字化图像与传感器混合识别也是一种受到重视的识别方式^[25]。一些研究在介入器械内部植入微电极, 根据其使用情况包含不同数量的连接电极, 通过利用射频能量测量电信号, 使得器械内的电极在 X 线图像下清晰可见^[26-27]。此类方法的核心在于能够检测到器械内电极并区分其近端和躯干电极, 进而生成 1 个器械模型, 以便在后续的 X 线图像中确定其最可能的位置。基于上述原理, Wang 等^[28]加入了导管模型判断机制, 可以根据模型形态判断出导管类型和近端。Ha 等^[29]提出了一种将 FBG 传感与电磁跟踪和 X 射线图像相结合的解决方案, 克服导管的扭曲不确定性。

2 腔内器械形状检测

形状检测专注于精确获取介入器械近端的姿态及其朝向, 用于在手术中选择入路血管。通过自动识别与形态检测, EIR 能够获取更多关于器械近端的反馈信息, 为医生和 EIR 本身在执行手术时提供更加准确的指导和支持, 从而确保手术的精准性和效果。

2.1 光纤形状检测

通过将 FBG 传感器嵌入到介入器械中, 可以有效估测血管腔的内部形状。形状测定的过程如下: (1) 利用 FBG 传感器测量应变; (2) 依据测得的应变计算曲率和扭矩; (3) 参照纤维的数据, 推断纤维中心的曲率和扭矩; (4) 根据 Frenet-Serret 方程 (描述曲线在三维空间中运动的计算公式), 计算中心曲率和扭矩来确定器械的具体形状^[30]。FBG 具有体积小、易于集成、抗电磁干扰、快速询问和准分布式传感等特点, 常被用于改进微创工具^[31]。

有研究认为使用多根多芯光纤可以提高形状传感的可靠性, Han等^[31]提出了一种嵌入3根单芯光纤的原型针头, 其平均误差及最大误差分别为0.57 mm和1.33 mm。它可将多芯纤维嵌入介入导管中, 并降低传感器系统故障的发生率, 但该研究表明其成本相对较高。Lezcano等^[32]将1根多芯光纤嵌入到导管中, 他提出了一种改进Frenet-Serret方程的形状感知模型, 使得导管在三维形状重建中平均误差仅为0.160 mm。李天梁等^[33]则结合了FBG和EM传感器, 采用多项式拟合与神经网络进行形状重构, 简化了计算过程, 但多项式拟合可能导致微小的位置偏差。

2.2 器械力形变检测

器械力形变检测本质上是一种基于力传感器的改装结构。这一结构由多个灵活的力传感器组成, 嵌入介入器械内部, 特别集中于器械远端和血管腔内组织相互作用的弯曲段^[34-36]。力传感器的作用是捕捉位置和力的信息, 因为感知外部力量是其有效运作的基础。Xiang等^[37]借助近端的姿态测量以及器械本身的扭矩, 为器械在血管内的力测量提出了一种更为精确的形变估算策略。许多研究都尝试利用器械的弯曲信息来推测其受到的外部力, 但主要研究仍然集中在二维力方向的检测上。研究^[34]利用可转向导管近端姿态估算心脏组织接触时的外部力, 而Alkayas等^[38]基于导管的曲率数据, 进一步定义了度量接触力范围的指标, 这种范围化的力估计更符合临床实践需求。而在提高实用性方面, 任龙飞等^[39]通过模拟血管介入手术过程来获取介入器械导丝的变形量, 对介入器械近端进行建模, 用于更精确地转化力信息。然而, 基于模型的力估计需求精确模型且计算高效。为满足临床实时性, 一些研究采用基于AI的运动分析提供了高效模型^[40-42], 将力感应器数据离散化并减少计算负担, 但仍需考虑剪切和扭转应变的关键性。

2.3 数字化图像形状检测

图像形状检测提供了一种从视觉角度评估器械姿态的途径。这种方法依托AI技术, 特别是利用基于CNN的U-net分割算法, 它能够从介入影像中分析介入器械的近端姿态, 并准确获取形状与位置^[43-44]。Gherardini等^[45]利用U-net从X线图像中分割导管近端, 平均分割时间为71 mm。而Zheng等^[46]提出一种改进的U-Net, 以提高导管分割的准

确性分割速度。次年, Zhou等^[47]提出一种基于CNN结合金字塔注意力循环网络(PAR-Net), 实现可实时导丝分割和跟踪。图像形状检测方法已广受关注, 其最大的优势在于无须额外嵌入传感器^[25]。而在众多图像检测策略中, 使用基准标记是最常见且直接的方式^[48]。有些研究选择利用双平面图像对基准标记进行匹配, 并依此重建导管的三维空间结构^[25]。然而, 双平面图像可能会增加患者和医生的辐射负担, 更会使手术复杂化。为减少这种风险, 已有研究^[49]选择从连续的单平面影像中提取二维导管姿势, 而非使用双平面影像。尽管基于视觉的检测方法能够通过识别基准标记达到快速而高效的效果, 但准确地识别这些标记仍是一个技术挑战。

3 腔内器械跟踪

腔内器械追踪是指在成功识别器械后, 能够确定和追踪介入器械关键位置, 并反馈位置信息的技术。追踪的主要目的在于提供器械近端在血管腔内的具体位置和方向, 以实时更新当前介入器械的位置, 进而输出这些位置信息以供EIR使用。根据这些位置信息, 可以实现图像引导下的EIR手术导航^[50]。

3.1 光学跟踪

在EIR手术中, 光学追踪是一种传统追踪技术, 它能够通过监控手术设备的物理位置和方向实时地更新并提供这些信息。这一技术通常使用高精度的光学摄像头, 配合一种或多种被附加在手术设备上的反光标记或红外发射器, 这些标记或发射器可以发出特定频率的光线, 被光学摄像头捕捉并解析, 从而在三维空间中追踪和定位器械的运动。Langsch等^[51]提出了一个用超声EIR引导和三维路线图追踪导管的框架, 用于主动脉瘤治疗。这种方法旨在将经食道超声心动图与介入性X射线序列合并, 通过在X射线图像中定位探针并推断其位置实现追踪。光学追踪的主要限制在于, 要求患者和仪器跟踪器与光学摄像机之间有清晰的视线, 传感器和光源之间的任何障碍都会严重降低跟踪器的性能。此外, 光学追踪难以跟踪血管腔内的导丝, 内窥镜和导管等柔性介入工具。因此, 光学跟踪技术特别适用于放射治疗, 但不符合腔内介入手术要求。

3.2 电磁跟踪

电磁跟踪利用磁场控制和引导介入器械至病灶位置。使用这种追踪方式需配备额外硬件，如场发生器、电磁传感器和跟踪模块等。在 Rogers 等^[52]的研究中，通过分析电磁线圈产生的信号，推断出介入器械在磁场中的大致位置。对应用磁场梯度可从介入器械附近的组织接收信号，结合各方向的信号，可以在磁场坐标系中精确定位器械的三维位置。这种方法还可以检测器械头部的姿态，但经常需要磁共振或其他扫描设备的辅助。电磁跟踪的核心组件是集成跟踪模块，管理数据流、计算传感器的姿态，并提供给计算机辅助干预系统。已有丰富的电磁跟踪研究和完善的商业产品，提供多种形状和尺寸的场发生器和电磁传感器，可以与 EIR 集成。为解决传统电磁跟踪精度不高的问题，Ha 等^[29]提出一种使用纤维电磁跟踪和 X 射线图像进行光学形状传感的解决方案，研究团队在导管的轴线上安装了 2 个电磁传感器，克服导管扭曲不确定性的问题，其均方根误差报告为 0.54 mm。但电磁跟踪在临床应用中可能面临在 MRI 等大型设备旁或铁磁环境中信号受到干扰或失真的问题^[53]。

3.3 基于图像的器具近端跟踪

基于图像的器具近端跟踪技术，类似于图像视觉识别，避免了对额外硬件设备的需求，大幅提高 EIR 操作的便捷性和灵活性。当前，研究者们正倾向于构建适用于介入器械追踪的通用跟踪方法，需要预先收集的图像样本进行模型训练。Peng 等^[54]采用结合基于强度和基于学习的模型，以在透视图像序列中生成并追踪导管近端、导丝近端和导丝段的假设。Ullah 等^[55]提出基于 CNN 的图像分析追踪方法，先进行近端位置的粗略定位，再进行精确形状分割，但实时性尚不满足临床需求。国内的研究也取得不错的成果。周国敬等^[56]提出了一种“生成式”和“判别式”追踪框架，实现了实时准确的导丝追踪，再利用算法进行亚像素级别的定位和测量。这是追踪实时性的重大进步，但尚未应用于 EIR 系统进行实验。YOLO 作为在实时性方面表现优异的识别算法，可预测介入器械近端端点，同样适用于跟踪。在 Peng 等^[57]对导管的跟踪研究中，YOLO 展示了大约每秒 35 帧的快速计算能力。只要有充足的训练数据，YOLO 同样适用于其他手术工具的跟踪。综上，基于图像的器

械近端跟踪技术依赖复杂的算法，需在精度、速度和实用性中平衡。但通过深度学习等先进 AI 方法，可以进一步优化算法，以满足临床需求，将这些技术集成到 EIR 追踪系统是未来的研究方向。

4 识别与跟踪的技术融合及应用

在 EIR 实施介入器械的识别和跟踪过程中，应充分考虑实现的复杂性、成本、医师培训以及在临床环境中的安全性、实用性和适应性。对于识别技术而言，反馈式识别和混合式识别均需额外硬件支持，基于图像信息识别虽无需额外硬件或改变器械内部结构，但仍面临器械在图像中被遮挡的技术挑战^[58]。追踪比识别更为复杂，而且可能需要更多的硬件支持，但如果能将其与识别系统适当地结合，可以极大地提高整体系统的性能。器械内部元件信号既可用于识别亦可用于信号追踪，基于图像视觉识别的器具信息可以提取像近端或近端的关键位置作为跟踪依据等^[59]。识别和跟踪可以进行数据共享和融合，互相学习和优化，并通过并行处理和决策层面的融合来提高实时性能。虽然这可能增加开发和验证的复杂性，但得到的优势是可以进一步提高手术的精确性，而且可以减少对外部硬件的依赖。而在技术融合过程中，基于图像视觉的解决方案尤为重要。它们的设计初衷就是在临床环境中实现可用性和适应性，尽管仍有技术瓶颈，但随着 AI 技术的成熟，这些新技术的优点应该超过其引入的复杂性。

综上所述，腔内介入器械的识别和跟踪技术可以为临床医师和 EIR 提供自动、精准且实时的手术视野，使手术过程更加精确和安全。为了使 EIR 更好地应用于临床手术，识别和跟踪技术需要具备强大的泛化手术能力，并结合术前其他影像学信息。未来的技术趋势可能更偏向基于图像视觉技术，构建端到端的介入器械图像识别和跟踪系统，以提升手术质量。研究如何能够避免事前采集大量数据集的无监督训练方法，以及在不改变精度和实时性能前提下建立手术预警机制或许是处理视觉算法的 AI 未来的方向。此外，需要建立能使 EIR 与医师有效协作的机制，这可能更需要设计更直观和人性化的器械交互界面，让医师能快速、精确地了解手术过程中的实时信息，并将识别模型的结果与医师的经验和判断相结合，实现更精

确、高效的手术操作。应用于EIR手术中的识别与追踪技术各有挑战和发展趋势,未来技术的更新一定要以临床为出发点,借鉴各种技术,继续克服现有的挑战,推动技术创新和临床应用的发展。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

作者贡献声明:伍尚至参与本文设计实验和参考文献数据采集,起草论文和统计分析;陆清声参与对文章的知识性内容作批评性审阅及指导。

参考文献

- [1] 马丽媛,王增武,樊静,等.《中国心血管健康与疾病报告2022》要点解读[J].中国全科医学,2023,26(32):3975-3994. doi: 10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0408.
Ma LY, Wang ZW, Fan J, et al. Interpretation of report on cardiovascular health and diseases in China 2022[J]. Chinese General Practice, 2023, 26(32): 3975-3994. doi: 10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0408.
- [2] Nicholls M. Mark Nicholls speaks to Professor Eric Durand and Professor Rémi Sabatier about Europe's first remote robotic-assisted angioplasty procedure[J]. Eur Heart J, 2021, 42(32):3033-3035. doi: 10.1093/eurheartj/ehab085.
- [3] 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.
- [4] 童静,储呈晨,李斌.血管介入手术机器人及其力反馈技术研究进展[J].中国普通外科杂志,2023,32(6):915-922. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013.
Tong J, Chu CC, Li B. Vascular interventional surgery robot and its force feedback technology[J]. China Journal of General Surgery, 2023, 32(6):915-922. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013.
- [5] 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.
He H, Ye ZJ, Shu C. Essential techniques and current research situation in robotic endovascular systems[J]. China Journal of General Surgery, 2021, 30(12): 1477-1484. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2021.12.012.
- [6] Collins GC, Brumfiel TA, Bercu ZL, et al. Dual-resonance (16/32 MHz) piezoelectric transducer with a single electrical connection for forward-viewing robotic guidewire[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2022, 69(4): 1428-1441. doi: 10.1109/TUFFC.2022.3150746.
- [7] Chen XY, Zhang YN, Shen LY, et al. Fabrication and shape detection of a catheter using fiber Bragg grating[J]. Adv Manuf, 2020, 8(1):107-118. doi: 10.1007/s40436-019-00284-z.
- [8] Al-Ahmad O, Ourak M, Vlekken J, et al. Local one-dimensional motion estimation using FBG-based shape sensing for cardiac applications[J]. IEEE Robotics Autom Lett, 2022, 7(3):8122-8129. doi: 10.1109/LRA.2022.3186761.
- [9] Anfinogentov V, Karimov K, Kuznetsov A, et al. Algorithm of FBG spectrum distortion correction for optical spectra analyzers with CCD elements[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(8):2817. doi: 10.3390/s21082817.
- [10] Ramadani A, Maier H, Bourier F, et al. Feature-based electromagnetic tracking registration using bioelectric sensing[J]. IEEE Robotics Autom Lett, 2023, 8(6):3286-3293. doi: 10.1109/LRA.2023.3262988.
- [11] Piskarev Y, Shintake J, Chautems C, et al. A variable stiffness magnetic catheter made of a conductive phase-change polymer for minimally invasive surgery[J]. Adv Funct Mater, 2022, 32(20): 2107662. doi: 10.1002/adfm.202107662.
- [12] Magnusson P, Johansson E, Månsson S, et al. Passive catheter tracking during interventional MRI using hyperpolarized ^{13}C [J]. Magn Reson Med, 2007, 57(6): 1140-1147. doi: 10.1002/mrm.21239.
- [13] Wegner F, Lüdtke-Buzug K, Cremers S, et al. Bimodal interventional instrument markers for magnetic particle imaging and magnetic resonance imaging-a proof-of-concept study[J]. Nanomaterials (Basel), 2022, 12(10): 1758. doi: 10.3390/nano12101758.
- [14] Lu P, Xia J, Li ZC, et al. A vessel segmentation method for multi-modality angiographic images based on multi-scale filtering and statistical models[J]. Biomed Eng Online, 2016, 15(1): 120. doi: 10.1186/s12938-016-0241-7.
- [15] Useche Murillo PC, Moreno RJ, Pinzon Arenas JO. Comparison between CNN and Haar classifiers for surgical instrumentation classification[J]. Ces, 2017, 10(28): 1351-1363. doi: 10.12988/ces.2017.711157.
- [16] Li RQ, Xie XL, Zhou XH, et al. A unified framework for multi-guidewire endpoint localization in fluoroscopy images[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2022, 69(4): 1406-1416. doi: 10.1109/TBME.2021.3118001.
- [17] Song HS, Yi BJ, Won JY, et al. Learning-based catheter and guidewire-driven autonomous vascular intervention robotic system for reduced repulsive force[J]. J Comput Des Eng, 2022, 9(5):1549-1564. doi: 10.1093/jcde/qwac074.
- [18] 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. doi: [10.1155/2020/1793517](https://doi.org/10.1155/2020/1793517).
- [19] Zhao Y, Xing H, Guo S, et al. A novel noncontact detection method of surgeon's operation for a master-slave endovascular surgery robot[J]. Med Biol Eng Comput, 2020, 58(4): 871–885. doi: [10.1007/s11517-020-02143-7](https://doi.org/10.1007/s11517-020-02143-7).
- [20] Vlontzos A, Mikolajczyk K. Deep segmentation and registration in x-ray angiography video[DB]. arXiv preprint arXiv, 2018, (1): 1–8. doi: [10.48550/arXiv.1805.06406](https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.06406).
- [21] 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(1): 51. doi: [10.1186/s12893-023-01944-5](https://doi.org/10.1186/s12893-023-01944-5).
- [22] Ma Y, James Housden R, Fazili A, et al. Real-time registration of 3D echo to X-ray fluoroscopy based on cascading classifiers and image registration[J]. Phys Med Biol, 2021, 66(5): 055019. doi: [10.1088/1361-6560/abe420](https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe420).
- [23] Vöth T, König T, Eulig E, et al. Real-time 3D reconstruction of multiple guidewires at dose values of conventional 2D fluoroscopy[C]//SPIE Medical Imaging. Proc SPIE 12031, Medical Imaging 2022: Physics of Medical Imaging, San Diego, California, USA. 2022, 12031:405–409. doi: [10.1117/12.2606579](https://doi.org/10.1117/12.2606579).
- [24] Abdulhafiz I, Janabi-Sharifi F. A hybrid approach to 3D shape estimation of catheters using ultrasound images[J]. IEEE Robotics Autom Lett, 2023, 8(4): 1912–1919. doi: [10.1109/LRA.2023.3244415](https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3244415).
- [25] Peng W, Wu W, Zhang J, et al. An automatic framework for estimating the pose of the catheter distal section using a coarse-to-fine network[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 225: 107036. doi: [10.1016/j.cmpb.2022.107036](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107036).
- [26] Zhao Z, Li R, Xu LJ, et al. Angular needle tracker and stabilizer for image-guided interventions[J]. Minim Invasive Ther Allied Technol, 2022, 31(3): 410–417. doi: [10.1080/13645706.2020.1832122](https://doi.org/10.1080/13645706.2020.1832122).
- [27] Sahu SK, Sozer C, Rosa B, et al. Shape reconstruction processes for interventional application devices: state of the art, progress, and future directions[J]. Front Robot AI, 2021, 8: 758411. doi: [10.3389/frobt.2021.758411](https://doi.org/10.3389/frobt.2021.758411).
- [28] Wang Y, Lam HK, Hou ZG, et al. High-resolution feature based central venous catheter tip detection network in X-ray images[J]. Med Image Anal, 2023, 88: 102876. doi: [10.1016/j.media.2023.102876](https://doi.org/10.1016/j.media.2023.102876).
- [29] Ha XT, Ourak M, Al-Ahmad O, et al. Robust catheter tracking by fusing electromagnetic tracking, fiber Bragg grating and sparse fluoroscopic images[J]. IEEE Sens J, 2021, 21(20): 23422–23434. doi: [10.1109/JSEN.2021.3107036](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3107036).
- [30] Wang K, Wu Z, Wu R, et al. Direct fabrication of flexible strain sensor with adjustable gauge factor on medical catheters[J]. J Sci Adv Mater Devices, 2023, 8(3): 100558. doi: [10.1016/j.jsamd.2023.100558](https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100558).
- [31] 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 (Basel), 2023, 23(16): 7243. doi: [10.3390/s23167243](https://doi.org/10.3390/s23167243).
- [32] Lezcano DA, Iordachita, Kim JS. Lie-group theoretic approach to shape-sensing using FBG-sensorized needles including double-layer tissue and S-shape insertions[J]. IEEE Sens J, 2022, 22(22): 22232–22243. doi: [10.1109/JSEN.2022.3212209](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3212209).
- [33] 李天梁, 宋珍珍, 陈发银, 等. 光纤光栅与人工智能融合的形状自感知穿刺针[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 160–167. doi: [10.37188/OPE.20233102.0160](https://doi.org/10.37188/OPE.20233102.0160).
Li TL, Song ZZ, Chen FY, et al. Fiber Bragg grating and artificial intelligence fusion for shape self-sensing puncture needle[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(2): 160–167. doi: [10.37188/OPE.20233102.0160](https://doi.org/10.37188/OPE.20233102.0160).
- [34] Pourafzal M, Talebi A, Rabenoroso K. Stochastic model-based contact force estimation for concentric tube robots[J]. Mech Mach Theory, 2023, 180: 105135. doi: [10.1016/j.mechmachtheory.2022.105135](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105135).
- [35] Ha XT, Wu D, Lai CF, et al. Contact localization of continuum and flexible robot using data-driven approach[J]. IEEE Robotics Autom Lett, 2022, 7(3): 6910–6917. doi: [10.1109/LRA.2022.3176723](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3176723).
- [36] Deaton NJ, Brumfiel TA, Sarma A, et al. Simultaneous shape and tip force sensing for the COAST guidewire robot[J]. IEEE Robotics Autom Lett, 2023, 8(6): 3725–3731. doi: [10.1109/LRA.2023.3267008](https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3267008).
- [37] Xiang P, Zhang J, Sun D, et al. Learning-based high-precision force estimation and compliant control for small-scale continuum robot[J]. IEEE Trans Autom Sci Eng, 2023, PP(99): 1–13. doi: [10.1109/TASE.2023.3311179](https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3311179).
- [38] Alkayyas AY, Feliu-Talegon D, Mathew AT, et al. Shape and tip force estimation of concentric tube robots based on actuation readings alone[C]//2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). April 3–7, 2023, Singapore, Singapore. IEEE, 2023: 1–8. doi: [10.1109/RoboSoft55895.2023.10121920](https://doi.org/10.1109/RoboSoft55895.2023.10121920).
- [39] 任龙飞, 孟德, 刘博, 等. 基于图像的介入器械前端变形建模与受力估计[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(3): 1001–1008. doi: [10.11834/jig.210653](https://doi.org/10.11834/jig.210653).
Ren LF, Meng C, Liu B, et al. Image-based deformation modeling and force estimation of the front end of vascular interventional surgical apparatus[J]. Journal of Image and Graphics, 2022, 27(3): 1001–1008. doi: [10.11834/jig.210653](https://doi.org/10.11834/jig.210653).
- [40] Kong Y, Wang J, Zhang N, et al. Dexterity analysis and motion optimization of In-situ torsionally-steerable flexible surgical robots[J]. IEEE Robotics Autom Lett, 2022, 7(3): 8347–8354. doi: [10.1109/LRA.2022.3183531](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3183531).
- [41] Chaillou P, Shi J, Kruszewski A, et al. Reduced finite element

- modelling and closed-loop control of pneumatic-driven soft continuum robots[C]//2023 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSof). April 3–7, 2023, Singapore, Singapore. IEEE, 2023:1–8. doi: 10.1109/RoboSof55895.2023.10122081.
- [42] Qiao Q, Borghesan G, De Schutter J, et al. Force from shape—estimating the location and magnitude of the external force on flexible instruments[J]. IEEE Trans Robotics, 2021, 37(5): 1826–1833. doi: 10.1109/TRO.2021.3062504.
- [43] Wei W, Yang D, Li L, et al. An intravascular catheter bending recognition method for interventional surgical robots[J]. Machines, 2022, 10(1):42. doi: 10.3390/machines10010042.
- [44] Holm Andersen JK, Schwaner KL, Savarimuthu TR. Real-time segmentation of surgical tools and needle using a mobile-U-net[C]//2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). December 6–10, 2021, Ljubljana, Slovenia. IEEE, 2022:148–154. doi: 10.1109/ICAR53236.2021.9659326.
- [45] Gherardini M, Mazomenos E, Menciassi A, et al. Catheter segmentation in X-ray fluoroscopy using synthetic data and transfer learning with light U-nets[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2020, 192:105420. doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105420.
- [46] Zheng Y, Er MJ, Shen S, et al. An improved image segmentation model based on U-net for interventional intravascular robots[C]//2021 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). May 14–16, 2021, Wuhan, China. IEEE, 2021: 84–90. doi: 10.1109/ICoIAS53694.2021.00023.
- [47] Zhou YJ, Xie XL, Zhou XH, et al. Pyramid attention recurrent networks for real-time guidewire segmentation and tracking in intraoperative X-ray fluoroscopy[J]. Comput Med Imaging Graph, 2020, 83:101734. doi: 10.1016/j.compmedimag.2020.101734.
- [48] Tsoumakidou G, Saltiel S, Villard N, et al. Image-guided marking techniques in interventional radiology: a review of current evidence[J]. Diagn Interv Imaging, 2021, 102(12): 699–707. doi: 10.1016/j.diii.2021.07.002.
- [49] Heemeyer F, Choudhary A, Desai JP. Pose-aware C-arm calibration and image distortion correction for guidewire tracking and image reconstruction[C]//2020 International Symposium on Medical Robotics (ISMR). November 18–20, 2020, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2021:181–187. doi: 10.1109/ISMR48331.2020.9312944.
- [50] 陆清声. 血管腔内介入手术机器人的特点和未来发展方向[J]. 机器人外科学杂志: 中英文, 2020, 1(4):231–235. doi: 10.12180/j.issn.2096–7721.2020.04.001.
- Lu QS. Characteristics and future development of endovascular intervention robot[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2020, 1(4):231–235. doi: 10.12180/j.issn.2096–7721.2020.04.001.
- [51] Langsch F, Virga S, Esteban J, et al. Robotic ultrasound for catheter navigation in endovascular procedures[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). November 3–8, 2019, China. IEEE, 2020:5404–5410. doi: 10.1109/IROS40897.2019.8967652.
- [52] Rogers T, Campbell-Washburn AE, Ramasawmy R, et al. Interventional cardiovascular magnetic resonance: state-of-the-art[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2023, 25(1): 48. doi: 10.1186/s12968–023–00956–7.
- [53] Alexander Jaeger H, O'Donoghue K, Cantillon-Murphy P. Electromagnetic tracking in guided medical interventions[C]//2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC). May 30–June 4, 2022, Gran Canaria, Spain. IEEE, 2022: 1–4.
- [54] Peng W, Wang Z, Xie H, et al. Design, development and evaluation of an ergonomically designed dual-use mechanism for robot-assisted cardiovascular intervention[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2023, 18(2):205–216. doi: 10.1007/s11548–022–02755–4.
- [55] 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. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950263.
- [56] 周国敬, 梁世超, 李振锋, 等. 基于图像识别的血管介入器械追踪方法[J]. 北京生物医学工程, 2022, 41(1):90–96. doi: 10.3969/j.issn.1002–3208.2022.01.015.
- Zhou GJ, Liang SC, Li ZF, et al. Instrument tracking methods of vascular intervention based on image recognition[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2022, 41(1): 90–96. doi: 10.3969/j.issn.1002–3208.2022.01.015.
- [57] Peng J, Chen Q, Kang L, et al. Autonomous recognition of multiple surgical instruments tips based on arrow OBB-YOLO network[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2022, 71: 1–13. doi: 10.1109/TIM.2022.3162596.
- [58] Karstensen L, Ritter J, Hatzl J, et al. Learning-based autonomous vascular guidewire navigation without human demonstration in the venous system of a porcine liver[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2022, 17(11): 2033–2040. doi: 10.1007/s11548–022–02646–8.
- [59] Gumbs AA, Grasso V, Bourdel N, et al. The advances in computer vision that are enabling more autonomous actions in surgery: a systematic review of the literature[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(13): 4918. doi: 10.3390/s22134918.

(本文编辑 熊杨)

本文引用格式:伍尚至,陆清声.血管介入手术机器人的腔内器械自动识别与跟踪研究进展[J].中国普通外科杂志,2023,32(12):1936–1943. doi:10.7659/j.issn.1005–6947.2023.12.013

Cite this article as: Wu SZ, Lu QS. Research progress on surgical instrument automatic recognition and tracking for endovascular interventional robotics[J]. Chin J Gen Surg, 2023, 32(12):1936–1943. doi:10.7659/j.issn.1005–6947.2023.12.013