



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013  
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013  
China Journal of General Surgery, 2023, 32(6):915-922.

· 文献综述 ·

## 血管介入手术机器人及其力反馈技术研究进展

童静<sup>1,2</sup>, 储呈晨<sup>2</sup>, 李斌<sup>2</sup>

(1.上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2.上海交通大学附属第六人民医院 医学装备处, 上海 200233)

### 摘要

血管介入手术是一种利用导管和导丝等器械,在视觉影像引导下,通过皮肤微创穿刺进入血管,对病变部位进行诊疗的手术方式。它具有创伤小、恢复快、并发症少等优点,已成为心脑血管疾病等多种疾病的首选治疗方法。然而,由于血管的狭窄性和复杂性,在血管内部操作导管难以做到,加重了医生的认知负荷,延长了手术时间,继而增加操作者和患者的疲劳程度以及手术风险。另一方面,血管介入手术对医生操作熟练程度要求高,而可以开展大量手术的医生数量有限。这些都大大限制了血管介入手术的广泛应用。为了解决这些问题,机器人辅助血管介入手术因其精确性、灵活性、便捷性已经受到患者和医生的共同期待,是实现血管介入手术远程化、智能化、数字化的重要手段。然而,相对于血管介入手术机器人图像导航、机械臂结构等其他关键技术,力反馈技术仍然有较大空白,力反馈的缺失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。故笔者在此分析血管介入手术机器人力反馈技术的基本问题、实现方式和技术需求,并结合国内外研究进展,探讨了力反馈技术的发展方向,为血管介入手术机器人力反馈技术的研究提供了理论参考和实践指导。从工程设计的角度出发,从人手感知力问题和力补偿力损耗问题两个方面阐述了力反馈技术面临的基本问题,并简述人手感知力的过程、感知力的范围、力损耗原因以及力补偿方法。目前国内外关于血管介入手术机器人力反馈技术的研究还处于起步阶段,主要集中在基于机械作用、电流变液和磁流变液等方式的实验验证和系统开发上,这些方式虽然能够实现一定程度上的力反馈效果,但也存在一些局限性和不足之处:机械力反馈难以克服惯性,噪声干扰和体积庞大限制应用场景;电流变液力反馈工作电压大大超出人体安全阈值;磁流变液力反馈伴随产生的大量热气以及被动黏度产生的摩擦力干扰了准确的力呈现。因此,需要进一步探索更高效、更灵敏、更稳定、更适合远程操作的力反馈技术。另外,“局部力反馈”和“感知替代”也是值得探讨的两种有潜力的力反馈方式。对于力反馈技术实现的需求,从力传递过程出发,从传感器、力检测、力反馈三个方面进行深入分析,并结合国内外最新的研究成果进行阐述。随着人工智能、大数据、物联网、无线通信、材料学、物理学等其他交叉学科的发展,可以为血管介入手术机器人力反馈技术提供更多可能性和创新点。同时,建立基于信息融合技术的监控平台,完善相应法律法规,降低成本、临床试验验证、融合5G和虚拟现实技术等,可以使得血管介入手术机器人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; 机器人手术; 力矩; 反馈; 综述

中图分类号: R654.3

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划基金资助项目(2022YFC2408700; 2022YFC2407005)。

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-05-27。

作者简介: 童静,上海市第六人民医院硕士研究生,主要从事医疗设备研究与管理方面的研究。

通信作者: 李斌, Email: Libin2001@hotmail.com

# Vascular interventional surgery robot and its force feedback technology

TONG Jing<sup>1,2</sup>, CHU Chengchen<sup>2</sup>, LI Bin<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Department of Medical Equipment, Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200233, China)

## Abstract

Vascular interventional surgery is a surgical method that uses instruments such as catheters and guide wires to enter the blood vessels through a minimally invasive skin puncture under visual image guidance and performs diagnosis and treatment on the lesion site. It has the advantages of small trauma, fast recovery, and few complications, and it has become the preferred treatment method for various diseases, such as cardiovascular and cerebrovascular diseases. However, due to the narrow and complex nature of blood vessels, manipulating catheters inside them becomes challenging, increasing the cognitive load on doctors, prolonging surgery time, and raising fatigue levels and surgical risks for operators and patients. On the other hand, vascular interventional surgery requires the high proficiency of doctors, and the number of doctors who can carry out many operations is limited. These greatly limit the broad application of vascular interventional surgery. Robot-assisted vascular interventional surgery has been expected to solve these problems for its accuracy, flexibility, and convenience. Realizing vascular interventional surgery's remoteization, intelligentization, and digitalization is essential. However, compared with other key technologies, such as image navigation and mechanical arm structure of vascular interventional surgery robots, force feedback technology still has a large gap. The lack of force feedback limits its application in complex and challenging, calcified, and chronic occlusive lesions. Therefore, this paper analyzes the fundamental problems, implementation methods, and technical requirements of force feedback technology for vascular interventional surgery robots and discusses the development direction of force feedback technology in combination with domestic and foreign research progress, providing theoretical reference and practical guidance for the research of force feedback technology for vascular interventional surgery robots. From the perspective of engineering design, the fundamental problems faced by force feedback technology are explained from two aspects: the problem of manual force perception and the problem of force compensation force loss, and the process of manual force perception, the range of perceived force, the causes of force loss and the method of force compensation are briefly described. Domestic and foreign research on force feedback technology for vascular interventional surgery robots is still in its infancy, mainly focusing on experimental verification and system development based on mechanical action, electrorheological fluid, and magnetorheological fluid. Although these methods can achieve a certain degree of force feedback effect, they also have some limitations and shortcomings: mechanical force feedback is difficult to overcome inertia; noise interference and large volume limit application scenarios; electrorheological fluid force feedback working voltage greatly exceeds human body safety threshold; magnetorheological fluid force feedback is accompanied by a large amount of heat and friction from the passive viscosity that interferes with accurate force presentation. Therefore, exploring more efficient, sensitive, stable, and suitable remote operation force feedback technology is necessary. In addition, "local force feedback" and "perceptual substitution" are two promising force feedback methods worth exploring. For the technical requirements of force feedback implementation, this paper analyzes in depth from sensor, force detection, and force feedback based on the force transmission process and elaborates on the latest research results at home and abroad. With the development of other interdisciplinary disciplines such as artificial intelligence, big data, the Internet of Things, wireless communication, materials science, and physics, more possibilities and innovations can be provided for force feedback technology for vascular interventional surgery

robots. At the same time, establishing a monitoring platform based on information fusion technology, improving relevant laws and regulations, reducing costs, conducting clinical trials and validations, and integrating 5G and virtual reality technologies can enable broader applications of robot-assisted vascular intervention surgery.

#### Key words

Endovascular Procedures; Minimally Invasive Surgical Procedures; Robotic Surgical Procedures; Torque; Feedback; Review

CLC number: R654.3

根据2022年6月发布的《中国心血管健康与疾病报告2021》，心血管疾病已成为医学界公认超越癌症的人类健康头号杀手，且发病率呈上升趋势<sup>[1]</sup>。同时，研究<sup>[2]</sup>表明心血管疾病患者更容易感染COVID-19，死亡风险也更高。微创血管介入手术因为创伤小、恢复快、并发症少等优点，已经成为治疗心血管疾病的主要治疗手段<sup>[3]</sup>。但是，这种手术需要长时间的X光辐射，给医生带来不可忽视的危害，如肌节长度延长、早期血管老化、白血病、骨髓瘤、骨癌等<sup>[4]</sup>。血管介入手术机器人技术的出现，提供了手术部分过程自动化的可能性，也为医疗带来了革命性的变化。当前，新产品和新技术不断涌现，例如，Stereotaxis公司在首个磁导航Niobe系统<sup>[5]</sup>的基础上，设计出的Genesis RMN系统<sup>[6-7]</sup>，它缩小了永磁体的体积，改进了磁体的操控方式，提高了响应速率。Corindus公司的CorPath GRX<sup>[8]</sup>则在CorPath 200<sup>[9-10]</sup>的基础上，增强了主动变形导管的功能，并进行了人体试验。

与腔镜、骨科等手术不同，血管介入手术高度依赖于装置的反馈信息。因此，如何让机器人更好地充当我们的“眼”和“手”就显得非常关键。血管介入手术机器人的视觉反馈主要依靠图像导航技术。磁共振、光学相干断层扫描、血管内超声显像、荧光成像等影像学技术可以用来发展兼容导管技术，从而提升血管介入机器人导航图像系统的性能，使机器人在手术中能看得更清楚、更远，操作更精准<sup>[11]</sup>。力反馈的缺失限制了机器人在复杂困难病变、钙化病变、慢性闭塞病变中的应用，然而目前还没有非常成熟的具有力反馈功能的血管介入手术机器人。这一亟待解决的难题需要通过相关零部件和配套技术的不断优化和创新来实现技术突破，仍然有很长的路要走。自从2005年Beyar等<sup>[12]</sup>首次实现了机器人辅助远程冠状动脉介入手术，到2022年微亚医疗手术机器人<sup>[13]</sup>成功完成了动物的冠脉造影和支架置放手术，

研究者一直在不断探索血管介入手术机器人临床应用的可能性和广度。如果能够研发更为成熟的力反馈技术，将有助于提高医生的操作效率和精准度，从而促进血管介入手术机器人的普及和应用。本综述旨在阐述血管介入手术机器人力反馈技术面临的基本问题、不同实现方式的研究现状以及分析技术实现的必须要求和其未来发展方向。

## 1 设计力反馈单元面临的基本问题

血管介入手术涉及血管的最内层，即内膜，由内皮和内皮下层组成，含有丰富的酶、弹性纤维、胶原纤维和少量的纵平行滑肌，有利于血液的流通。血管的内膜非常薄且易受损，一旦损伤，可能导致失血性休克、出血刺激、压迫周围组织、下游组织缺血等严重后果，甚至危及生命<sup>[14]</sup>。在传统手术过程中，医生需要根据自身经验和视觉反馈信息，判断导管与血管内膜的接触力是否会造成损伤。但是，医生的经验、疲劳程度、手部震颤等因素也会影响导管的操作。使用介入手术机器人，尤其是具有力反馈功能的机器人，可以有效避免这些不利因素，实现手术的半自动化和稳定性。为了更好地设计出精准的力反馈单元，需要考虑几个基本问题。

### 1.1 人手的感知力问题

要实现力反馈单元，首先要了解人手能够准确地感受到力的过程。当手部皮肤受到外部机械刺激时，皮肤中的感受器群体会产生放电响应，这些信号通过神经传送给大脑进行综合分析，形成力感知。目前，血管介入手术机器人的力感知主要是压力感知（即力的可分解量化）。研究<sup>[15]</sup>表明，人手感知力的最小阈值为0.05 N，差别阈值在0.5~1.5 N之间。因此，力反馈单元设计的最小阈值要<0.05 N。同时，力反馈单元设计的最大阈值要考虑医生的疲劳感，保证医生手术操作的舒适

度。此外，为了更加精准地获得人手与力反馈的感知情况，可以尝试建立相应的力感知模型，获得人体感知与客观刺激之间的定量描述，以此促进力反馈技术的发展。

## 1.2 力损耗和力补偿问题

从导管或导丝接受力，到人手感知力，这个过程中会有一些力的损耗，导致反馈到人手的力精度不足，影响力反馈的透明性。这些力的损耗可能源于血管介入手术机器人中的连杆重力、机械惯性等因素引起的摩擦力。因此，需要设置相应的机械力补偿单元或引入力补偿控制算法，来平衡损耗力的力矩。根据补偿力的性质，可以分为配重补偿、弹簧补偿和辅助执行器拖动装置补偿<sup>[16]</sup>。例如，Mashayekhi等<sup>[17]</sup>通过弹簧使固定电机带动钢丝实现力补偿，效果显著。Fukushima等<sup>[18]</sup>提出了一种新的实现触觉和双边控制的最小二乘法（least square method, LSM）在线补偿方法，省去了增值编码器的安装。力补偿也可以通过输入扭矩的最优控制来实现，例如，Wang等<sup>[19]</sup>采用支持向量机（support vector machine, SVM）算法实现系统中的摩擦力补偿。然而，基于模型的智能摩擦补偿方案在实践中识别参数是繁琐且耗时的过程，因此Dong等<sup>[20]</sup>提出了一种基于深度高斯过程（deep gaussian processes, DGP）的手术机器人系统触觉主手的无模型摩擦补偿方案。

## 2 血管介入手术机器人力反馈的实现方式

由于现有的商业操作手柄存在运动行程有限、不符合医生操作习惯、不能实现360°连续旋转（例如Touch X<sup>[21]</sup>）、成本高昂等问题，如何研究出更适合介入手术机器人临床使用的力反馈系统成为当前的研究热点。根据反馈力单元的原理不同，血管介入手术机器人的力反馈可以分为：基于机械作用的力反馈、基于电流变液的力反馈、基于磁流变液的力反馈等方式<sup>[22]</sup>。

### 2.1 机械力反馈

基于机械原理的血管介入手术机器人力反馈方式是较早发展的一种方式。Payne等<sup>[23]</sup>研发了一款介入手术机器人，该机器人利用主端的音圈电机实现径向力反馈功能，当导管末端的应变片检测到碰撞力时，计算机将力的数值传递给音圈电机，音圈电机产生力再传递给人手。该系统的优点是符合人体工学设计，模拟医生真实操纵导管，

减少了学习时间；缺点是没有实现轴向力反馈功能，且设计的行程太短，需要频繁往复调整。Yang等<sup>[24]</sup>研发了一种主从介入手术机器人的同构交互式主控制器，与其他研究不同的是，它采用了两种不同的力反馈方式，一种是通过改变电流发送一个径向力反馈信号，电机产生相应的转矩，实现径向力反馈；另一种是通过调节励磁电流利用磁粉制动器产生扭矩，实现轴向力反馈。机械力反馈主要是通过计算机控制输入电压改变电机的转动扭矩实现，但由于启停过程中电机都需要克服一定的惯性，无法做到同步反馈，严重影响了医生的判断。而且加装了电机之后的整个机械系统都变得更复杂且体积庞大，压缩了手术空间，还会产生噪声影响<sup>[25]</sup>。因此，基于机械力作用的血管介入手术机器人力反馈系统仍存在明显弊端。

### 2.2 电流变液力反馈

因为机械力反馈反方无法解决的电机惯性问题，新兴智能材料进入到人们的视野当中。电流变液（electrorheological fluids, ERF）是一种可以通过改变外加电场改变其形态的特殊液体，一般由绝缘基础液、固体介电粒子及添加剂组成<sup>[26]</sup>。电流变效应指的是柔性材料（如悬浮液或胶体）在外加电场下其流变性能（如黏度、剪切应力、剪切模量等）发生显著变化的现象<sup>[27]</sup>。ERF可控的屈服应力、弹性模量是其成为智能材料的主要原因。Zakaria等<sup>[28]</sup>研发了一种具有非干预2自由度（推力和旋转）远程操作导管引导系统，推力和旋转机构都连接到一个包含ERF的圆盘上，当从端检测到力时，ERF的黏度增加产生阻力。然而基于ERF的力反馈方式因为所需电流过大，缺乏一定的安全性，无法投入到实际运用当中。这也是电流变液力反馈技术的致命缺点，这种智能材料的工作电压在0~5 kV左右，远远超过了人体的安全电压，实际应用过程中存在极大的安全隐患，工作条件受到极大限制<sup>[29]</sup>。

### 2.3 磁流变液力反馈

磁流变液（magnetorheological fluid, MRF）结构上与ERF类似，不同的是利用磁导原理，由软磁性颗粒、非导磁性载液和添加剂组成。羰基铁粉是软磁性颗粒的一般材料<sup>[30]</sup>。弥补了ERF不足的MRF，线圈中的电流通常在1~10 A的范围内，而且MRF相对于ERF具有更高的灵敏度，可根据磁场强度几毫秒内瞬时改变形态。因此，采用MRF产生阻尼应用于力反馈技术具有更为广阔的

发展前景。Guo等<sup>[31-32]</sup>设计了一种具有双通道触觉力界面的介入手术机器人系统,通过使用基于气缸的力发生器和基于MRF的力矩发生器,所设计的触觉力界面可以分别实现径向力反馈和轴向力反馈,具有应用潜力。但在MRF的使用过程中也发现了问题:(1)其流体状态在清洁区域(如手术室)的可用性存疑,并出现大量产热的现象(由于线圈的功耗),导致不准确的力呈现<sup>[33]</sup>; (2)基于MRF的系统因为其被动黏度(即在没有外部磁场的固有黏度),不能在导管上产生零摩擦度。在此基础上, Hooshiar等<sup>[34]</sup>开创性地提出利用磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)作为扭矩调节介质,使用永磁体代替线圈产生前所未有的径向磁场。该装置能够产生和控制高达115:50:7 mNm的阻力扭矩和高达5.77 N的触觉力,在机器人辅助心血管干预的触觉反馈应用方面显示出良好的性能。Liu等<sup>[35]</sup>设计了一种具有准确、快速的受力再生能力的机器人系统,该系统引入磁流变模糊阻尼器,具有高转矩精度和转矩响应快的优点。此外,还提出了一种基于磁场因素和MRF力学性能的阻尼器的精确转矩模型和补偿模型。基于MRF完成力反馈的,Zhang等<sup>[36]</sup>研制的一种机器人辅助导管/导丝手术系统,该系统利用外科医生通过经验获得的自然操作技能,并利用触觉提示产生碰撞检测,区分近端力是否达到安全阈值,以确保手术安全。Gao等<sup>[37]</sup>提出了一种新型的机器人系统平台,在应用传统插管方法的同时,能够产生沉浸式接近触觉,机器人助手不仅可以收集医生干预时的手部运动信息,而且装备了一个基于MRF的内部集成触觉接口,将导磁的轴盘浸入MRF中使得磁流变液链状反应产生的剪切力作用到轴盘,从而使医生感知到力,并将霍尔传感器内嵌入触觉接口中,用于检测MRF区域的磁感应强度。

#### 2.4 其他力反馈

除上述的直接力反馈方式外,力反馈也可以通过其他方式实现,比如“局部力反馈”和“感知替代”。Sankaran等<sup>[38]</sup>提出了一种血管内机器人系统,该机器人使用力校准来找到一个动态阈值,从而引起触觉振动,从而在机器人对血管施加过多的力时提示外科医生。Dagnino等<sup>[39]</sup>则提出了一种新的血管内置管机器人平台CathBot,它是一个符合人体工程学的主从系统,配备有导航系统和基于视觉的集成功力反馈,旨在保持血管外科医生的自然床边技能,并经试验证明,当其提供力反馈时,平均力下降70%,最大力下降61%。Yu等<sup>[40]</sup>借

助磁粉离合器设计了一款保持两指操作主手的介入手术机器人系统,因力传感器放置空间受限,所以利用杠杆原理将力觉信息放大传递给装置底部的压力传感器,又引入磁粉离合器提供力反馈。

### 3 血管介入手术机器人力系统的需求分析

无论是机械力反馈、电流变液力反馈、磁流变液力反馈或者其他力反馈技术,对于血管介入手术机器人系统而言,都需要经过以下几个步骤:力传感器检测导管/导丝与血管壁的接触力,计算机根据力信号估算反馈力,力反馈装置将反馈力传递给医生的主手,医生根据视觉和力觉反馈调整操作策略(图1)。根据血管介入手术机器人的特点,血管介入手术机器人系统应该具备以下几个方面的能力。

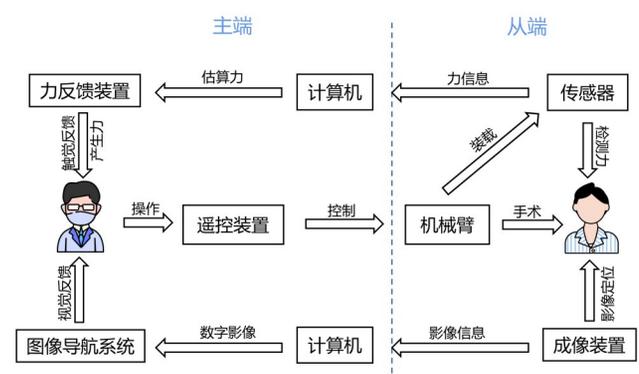


图1 血管介入手术机器人力反馈过程图

Figure 1 Human feedback process diagram of vascular intervention surgery machine

#### 3.1 合理的力传感器设计

一般而言,应变片是组成力传感器的主要元件,具有防水性能好、体积小等优点。它们通常贴在一块弹性体上并通过检测弹性体的形变程度实现多自由度检测力。因此,弹性体的设计需要考虑与机械结构的刚度相匹配。为了减少电阻式传感器的迟滞性影响,一般采用应变片和弹性体一体化的力传感器。另外,可替代应变片的新型导电聚合物材料也在小范围内得到了应用,例如,基于碳纳米管(carbon nano tube, CNT)传感器<sup>[41]</sup>、基于柔性导电聚合物复合材料(flexible conductive polymer composite, FCPC)传感器<sup>[42]</sup>。近年来,由于电阻式传感器在血管介入手术应用环境中存在尺寸限制,光纤力传感器得到了关注,并且相关技术也在积极开展研究,例如,Tang等<sup>[43]</sup>基于自

由和约束拓扑 (freedom and constraint topology, FACT) 方法开发了一种用于手术机器人触觉反馈的新型高精度光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG) 支持的三轴远端力传感器。

### 3.2 精准的受力检测

目前, 手术机器人领域的力检测方案主要有两种: 直接检测和间接检测。直接检测包括基于电阻和光纤两种方式; 间接检测包括基于位移以及基于执行器输入量两种方法<sup>[44]</sup>。对于血管介入手术机器人而言, 直接检测方式因为机械关节的间隙与摩擦对检测精度的影响, 力传感器放置于导管顶端位置为最优。但是血管内环境的特殊性也给传感器尺寸提出了高要求。间接检测简而言之就是检测与直接接触力有联动影响作用的元器件信息, 通过测量导管的近端力来估计导管与血管壁的接触力<sup>[45-46]</sup>。具体来说, 其中位移检测即为检测接触到力的弹性元器件 (如弹簧) 的位移变化, 执行器输入量主要是指根据电动机的电枢电流或气缸气压的变化建立相应数学模型估算力觉信息。

### 3.3 瞬时反馈能力

相对于其他外科手术, 血管介入手术因其操作环境的狭窄性对手术的每个步骤都要求极高, 过程中微小的差距都可能引发截然不同的手术结果。考虑到人体生理反应速度和人机交互系统反应时间, 力反馈装置应该具备优秀的瞬时反馈能力, 反应时间应短尽短, 减少整个力反馈系统的迟滞现象。

## 4 展望

电子科学和材料科学的飞跃进步飞速发展, 以及各学科的交叉融合, 促进了血管介入手术机器人力反馈技术的创新发展。这种技术有助于提高血管介入手术的精准性和微创性, 为医疗外科技术的进步带来了新的机遇。例如, 利用量子效应<sup>[47-48]</sup>、纳米技术 (nanotechnology, NT)<sup>[49-50]</sup>、微电机系统 (micro electromechanical system, MEMS) 技术<sup>[51]</sup>、仿生材料<sup>[52]</sup>等开发出具有优越性能且更适用于血管介入手术机器人的力传感器。人工智能、大数据、物联网等技术的发展, 以及多物理效应或多传感器的组合, 可以实现受力检测的自动化、实时化、远程化和智能化, 从而提高检测的全面性和灵敏度。新型智能材料的广泛应用也为直接力反馈方式带来了更多的创新空间。与此同时,

“局部力反馈”和“感知替代”等间接力反馈方式也有待进一步挖掘, 未来还有许多值得探索的研究方向。然而, 力反馈技术只是血管介入手术机器人系统中的一个方面, 要使血管介入手术机器人在临床中得到广泛应用, 还有很多工作要做。例如, 建立基于信息融合技术的监控平台, 保障手术的安全性; 完善相应法律法规, 避免伦理问题的发生; 打破垄断, 减轻医疗成本压力; 积累大量临床试验, 评估长期疗效等。除此以外, 5G技术和虚拟现实技术加快了信息传递速率, 为手术操作远程化提供了有力的技术支持。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突。

作者贡献声明: 本文的主要研究目标由童静提出, 并负责论文的设计、图的制作和文稿的撰写; 储呈晨负责进行文稿修改和完善; 李斌负责文章的质量把关和审阅、提供资金支持, 对文稿的整体结构和内容有重要贡献。

### 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 2021》要点解读[J]. 中国全科医学, 2022, 25(27):3331-3346. doi: 10.12114/j.issn.1007-9572.2022.0506.  
Ma LY, Wang ZW, Fan J, et al. An essential introduction to the annual report on cardiovascular health and diseases in China (2021)[J]. Chinese General Practice, 2022, 25(27):3331-3346. doi: 10.12114/j.issn.1007-9572.2022.0506.
- [2] Li B, Yang J, Zhao FM, et al. Prevalence and impact of cardiovascular metabolic diseases on COVID-19 in China[J]. Clin Res Cardiol, 2020, 109(5): 531-538. doi: 10.1007/s00392-020-01626-9.
- [3] 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), China. Chinese experts' consensus on the evaluation index system of endovascular abdominal aortic aneurysm repair[J]. China Journal of General Surgery, 2018, 27(6): 669-673. doi: 10.3978/j.issn.1005-6947.2018.06.001.
- [4] Klein LW, Goldstein JA, Haines D, et al. SCAI multi-society position statement on occupational health hazards of the catheterization laboratory: shifting the paradigm for healthcare workers' protection[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 75(14): 1718-1724. doi: 10.1016/j.jacc.2020.02.015.
- [5] Pappone C, Augello G, Gugliotta F, et al. Robotic and magnetic

- navigation for atrial fibrillation ablation. How and why?[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2007, 4(6): 885-894. doi: 10.1586/17434440.4.6.885.
- [6] Hwang J, Kim JY, Choi H. A review of magnetic actuation systems and magnetically actuated guidewire- and catheter-based microrobots for vascular interventions[J]. *Intel Serv Robotics*, 2020, 13(1):1-14. doi: 10.1007/s11370-020-00311-0.
- [7] Swaminathan RV, Rao SV. Robotic-assisted transradial diagnostic coronary angiography[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2018, 92(1): 54-57. doi: 10.1002/ccd.27480.
- [8] Mendes Pereira V, Cancelliere NM, Nicholson P, et al. First-in-human, robotic-assisted neuroendovascular intervention[J]. *J NeuroIntervent Surg*, 2020, 12(4): 338-340. doi: 10.1136/neurintsurg-2019-015671.rep.
- [9] CorPath 200 Robotic System for Percutaneous Coronary Interventions Green Lighted in U.S.[EB/OL]. Available at: <https://www.medgadget.com/2012/07/corpath-200-robotic-system-for-percutaneous-coronary-interventions-green-lighted-in-u-s.html>.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Beyar R, Gruberg L, Deleanu D, et al. Remote-control percutaneous coronary interventions[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2006, 47(2):296-300. doi: 10.1016/j.jacc.2005.09.024.
- [13] 张舒怡, 曲新凯, 韩文正. 血管介入机器人辅助技术的研究进展[J]. *中国心血管病研究*, 2021, 19(8):764-768. doi: 10.3969/j.issn.1672-5301.2021.08.019.
- Zhang SY, Qu XK, Han WZ. Research progress of vascular interventional surgical robotic system[J]. *Chinese Journal of Cardiovascular Research*, 2021, 19(8): 764-768. doi: 10.3969/j.issn.1672-5301.2021.08.019.
- [14] 刘建民, 杨鹏飞, 李嵩. 全面认识血管损伤, 推动学科融合发展[J]. *第二军医大学学报*, 2021, 42(2):122-126. doi: 10.16781/j.0258-879x.2021.02.0122.
- Liu JM, Yang PF, Li H. To fully understand vascular impairment from the perspective of discipline integration[J]. *Academic Journal of Naval Medical University*, 2021, 42(2):122-126. doi: 10.16781/j.0258-879x.2021.02.0122.
- [15] Vinjamuri R. *Advances in Motor Neuroprostheses*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-38740-2.
- [16] Arakelian V. Gravity compensation in robotics[J]. *Adv Robotics*, 2016, 30(2):79-96.
- [17] Mashayekhi A, Nahvi A, Yazdani M, et al. VirSense: a novel haptic device with fixed-base motors and a gravity compensation system[J]. *Ind Robot*, 2014, 41(1): 37-49. doi: 10.1108/IR-02-2013-328.
- [18] Fukushima S, Sekiguchi H, Saito Y, et al. Online compensation of gravity and friction for haptics with incremental position sensors[C]//2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). Auckland, New Zealand: IEEE Press, 2017:1-6. doi: 10.1109/M2VIP.2017.8211458.
- [19] Wang GL, Li YF, Bi DX. Support vector network enhanced adaptive friction compensation[C]//Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, USA: IEEE, 2006: 3699-3704. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1642267.
- [20] Dong A, Du ZJ, Yan ZY. Friction modeling and compensation for haptic master manipulator based on deep Gaussian process[J]. *Mech Mach Theory*, 2021, 166: 104480. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104480.
- [21] 3D Systems. Touch-HAPTIC DEVICE [EB/OL]. (2016-06-09) [2023-06-02]. Available at: <https://cn.3dsystems.com/haptics-devices/touch>.
- [22] Zhao Y, Mei ZY, Luo XX, et al. Remote vascular interventional surgery robotics: a literature review[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(4):2552-2574. doi: 10.21037/qims-21-792.
- [23] Payne CJ, Rafii-Tari H, Yang GZ. A force feedback system for endovascular catheterisation[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, 2012: 1298-1304. doi: 10.1109/IROS.2012.6386149.
- [24] Yang C, Guo SX, Bao XQ. An isomorphic interactive device for the interventional surgical robot after in vivo study[J]. *Micromachines*, 2022, 13(1):111. doi: 10.3390/mi13010111.
- [25] Abiri A, Pensa J, Tao AN, et al. Multi-modal haptic feedback for grip force reduction in robotic surgery[J]. *Sci Rep*, 2019, 9:5016. doi: 10.1038/s41598-019-40821-1.
- [26] 韩翻珍, 杨秀娟, 丛丰, 等. 以专利技术信息分析电流变液的现状[J]. *中国科技产业*, 2023(2): 70-73. doi: 10.16277/j.cnki.cn11-2502/n.2023.02.019.
- Han FZ, Yang XJ, Cong F, et al. Analysis of the present situation of electrorheological fluids with patent technical information[J]. *Science & Technology Industry of China*, 2023(2): 70-73. doi: 10.16277/j.cnki.cn11-2502/n.2023.02.019
- [27] Liang Y, Huang D, Zhou X, et al. Efficient electrorheological technology for materials, energy, and mechanical engineering: from mechanisms to applications[J]. *Engineering*, 2022, 2022: S2095809922003526. doi: 10.1016/j.eng.2022.01.014.
- [28] Zakaria NAC, Komeda T, Low CY, et al. Development of foolproof catheter guide system based on mechatronic design[J]. *Prod Eng Res Devel*, 2013, 7(1):81-90. doi: 10.1007/s11740-012-0430-6.
- [29] Salunkhe H, Kolekar A, Thikane S. Electrorheological fluids: properties, technology and modern applications[J]. *IRJET*, 2023, 10(2):129-134.
- [30] 张进秋, 张建, 孔亚男, 等. 磁流变液及其应用研究综述[J]. *装甲*

- 兵工程学院学报, 2010, 24(2): 1-6. doi: 10.3969/j.issn.1672-1497.2010.02.001.
- Zhang JQ, Zhang J, Kong YN, et al. Summarization of magnetorheological fluid and its application[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(2): 1-6. doi: 10.3969/j.issn.1672-1497.2010.02.001.
- [31] Guo SX, Song Y, Yin XC, et al. A novel robot-assisted endovascular catheterization system with haptic force feedback[J]. IEEE Trans Robotics, 2019, 35(3): 685-696. doi: 10.1109/TRO.2019.2896763.
- [32] Shi P, Guo SX, Jin XL, et al. A two-channel haptic force interface for endovascular robotic systems[C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Beijing, China: IEEE, 2020: 1602-1606. doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233544.
- [33] Hooshiar A, Alkhalf A, Dargahi J. Development and assessment of a stiffness display system for minimally invasive surgery based on smart magneto-rheological elastomers[J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2020, 108:110409. doi: 10.1016/j.msec.2019.110409.
- [34] Hooshiar A, Payami A, Dargahi J, et al. Magnetostriction-based force feedback for robot-assisted cardiovascular surgery using smart magnetorheological elastomers[J]. Mech Syst Signal Process, 2021, 161:107918. doi: 10.1016/j.ymsp.2021.107918.
- [35] Liu Z, Wang S, Feng F, et al. A magnetorheological fluid based force feedback master robot for vascular interventional surgery[J]. J Intell Robot Syst, 2022, 106(1): 20. doi: 10.1007/s10846-022-01716-y.
- [36] Zhang LS, Gu SX, Guo SX, et al. A magnetorheological fluids-based robot-assisted catheter/guidewire surgery system for endovascular catheterization[J]. Micromachines (Basel), 2021, 12(6):640. doi: 10.3390/mi12060640.
- [37] Gao Q, Zhan Y, Song Y, et al. An MR fluid based master manipulator of the vascular intervention robot with haptic feedback[C]//2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan: IEEE, 2021:158-163. doi: 10.1109/ICMA52036.2021.9512709.
- [38] Sankaran NK, Chembrammal P, Kesavadas T. Force calibration for an endovascular robotic system with proximal force measurement[J]. Int J Med Robotics Comput Assist Surg, 2020, 16(2):e2045. doi: 10.1002/rcs.2045.
- [39] Dagnino G, Liu J, Abdelaziz MEMK, et al. Haptic feedback and dynamic active constraints for robot-assisted endovascular catheterization[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2019: 1770-1775. doi: 10.1109/IROS.2018.8593628.
- [40] Yu HY, Wang HB, Zhang W, et al. Master-slave system research of a vascular interventional surgical robot[C]//2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). Kandima, Maldives: IEEE, 2018:469-473. doi: 10.1109/RCAR.2018.8621763.
- [41] Kanoun O, Bouhamed A, Ramalingame R, et al. Review on conductive polymer/CNTs nanocomposites based flexible and stretchable strain and pressure sensors[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(2):341. doi: 10.3390/s21020341.
- [42] Zhou KK, Dai K, Liu CT, et al. Flexible conductive polymer composites for smart wearable strain sensors[J]. SmartMat, 2020, 1(1):e1010. doi: 10.1002/smm2.1010.
- [43] Tang ZX, Wang SX, Li M, et al. Development of a distal tri-axial force sensor for minimally invasive surgical palpation[J]. IEEE Trans Med Robotics Bionics, 2022, 4(1): 145-155. doi: 10.1109/TMRB.2022.3142361.
- [44] 付宜利, 李坤, 潘博, 等. 微创手术机器人力检测与力反馈技术研究现状[J]. 机器人, 2014, 36(1): 117-128. doi: 10.3724/SP.J.1218.2014.00117.
- Fu YL, Li K, Pan B, et al. A survey of force sensing and force feedback technology for robot-assisted minimally invasive surgical system[J]. Robot, 2014, 36(1): 117-128. doi: 10.3724/SP.J.1218.2014.00117.
- [45] Yin XC, Guo SX, Song Y. Magneto-rheological fluids actuated haptic-based teleoperated catheter operating system[J]. Micromachines, 2018, 9(9):465. doi: 10.3390/mi9090465.
- [46] Song Y, Guo SX, Yin XC, 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.
- [47] Shi L, Li Z, Chen M, et al. Quantum effect-based flexible and transparent pressure sensors with ultrahigh sensitivity and sensing density[J]. Nat Commun, 2020, 11(1):3529. doi: 10.1038/s41467-020-17298-y.
- [48] Gauglitz G. The new generation: quantum sensors[J]. Anal Bioanal Chem, 2021, 413(23): 5679-5680. doi: 10.1007/s00216-021-03554-7.
- [49] Fogliano F, Besga B, Reigue A, et al. Ultrasensitive nano-optomechanical force sensor operated at dilution temperatures[J]. Nat Commun, 2021, 12(1): 4124. doi: 10.1038/s41467-021-24318-y.
- [50] Beltrán SM, Slepian MJ, Taylor RE. Extending the capabilities of molecular force sensors via DNA nanotechnology[J]. Crit Rev Biomed Eng, 2020, 48(1): 1-16. doi: 10.1615/critrevbiomedeng.2020033450.
- [51] Algamili AS, Khir MHM, Dennis JO, et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices[J]. Nanoscale Res Lett, 2021, 16(1): 16. doi: 10.1186/s11671-021-03481-7.
- [52] Ye X, Li YY, Zhang Y, et al. A comprehensive review: recent developments of biomimetic sensors[J]. J Bionic Eng, 2022, 19(4): 853-876. doi: 10.1007/s42235-022-00181-5.

( 本文编辑 熊杨 )

**本文引用格式:**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

**Cite this article as:** Tong J, Chu CC, Li B. Vascular interventional surgery robot and its force feedback technology[J]. 2023, 32(6):915-922. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013