

神经介入手术机器人的研究进展

潘鹏宇¹ 郭丹^{1,2} 梁国标¹

¹北部战区总医院神经外科,全军神经医学研究所,沈阳 110016; ²北部战区总医院第一派驻门诊部,沈阳 110016

通信作者:梁国标,Email: liangguobiao6708@163.com

【摘要】 神经介入手术是治疗神经系统疾病的重要方法,机器人辅助治疗不仅可以提高手术的精准度,而且还可以减少辐射暴露等风险。目前,临床应用于神经介入手术的机器人包括 CorPath GRX、Magellan、VIR、RobEnt、“鲁班”和 VAS HERO 等系统,已成功完成了全脑血管造影术、颈动脉支架置入术、动脉瘤支架及血流导向装置置入术、弹簧圈栓塞术和动静脉瘘栓塞术,且具有较高的安全性和有效性。为了更加精准、平稳地完成神经介入手术,临床应用中在既往的泛血管介入机器人基础上,增加了适应颅内血管的控制软件、导丝递送模块、触觉反馈系统等。但是,神经介入机器人仍处于不断改进、迭代发展的时期,随着技术的成熟,有望在运动能力、精准控制、交互反馈及生物仿真等方面进步飞速,未来会为患者提供更加精准、安全的临床治疗。

基金项目:国家自然科学基金(81971133);辽宁省“兴辽人才计划”(XLYC2002109);辽宁省科技民生计划(2023JH2/101700096);沈阳市科技计划(20-205-4-017)

DOI: 10.3760/cma.j.cn112050-20230516-00145

神经介入手术已经成为颅内动脉瘤^[1]、颈动脉狭窄^[2]、急性缺血性卒中^[3]等神经系统疾病的重要治疗方法,具有创伤小、恢复快、住院周期短等优点。但是,目前仍然存在诸多制约神经介入手术发展的因素,如辐射暴露、操作技术难度大等^[4-7]。而神经介入机器人在提高手术精准度的同时,可最大限度地减少辐射暴露^[5],有可能减轻与电离辐射相关的职业危害,并可降低手术技术难度,在一定程度上确保手术的安全性。Miyachi 等^[8]使用神经介入机器人完成了首例远程手术,这给偏远地区的卒中患者的诊疗带来了希望。因此,神经介入机器人安全、有效地应用于临床具有重大意义。

目前,神经介入研究使用的是泛血管介入机器人,其最初用于心脏和外周血管介入的治疗^[9]。但该机器人相比于人工操作也有其弊端:首先,在神经介入手术中需要频繁更换各类导管和导丝,需要与机械臂钳匹配各类商业化配件;其次,机器人操作时缺乏手指的触觉感知,不能实时感受术中阻力的变化,难以根据力反馈调节前进的速度,从而造成血管破裂^[10]。另外,由于脑血管的管壁菲薄、直径纤细且走行迂曲^[5],从而给机器人辅助介入治疗增加了额外的难度。目前,有些小样本的研究将机器人用于神经介入手术中,但缺乏大规模的临床对照试验。本文旨在对目前由神经介入机器人完成的临床研究进行综述,回顾性分析其安全性和有效性,并总结神经介入机器人的应用方法及其特点。

一、神经介入机器人手术的安全性和有效性

机器人技术在经皮血管内介入治疗的首次研究可追溯至 2006 年完成的经皮冠状动脉支架成型术^[11];其在外周血管介入手术的获益也同样得到了证实^[12];后来,随着机器人

技术的不断发展和改进,其逐渐应用于神经介入手术中。目前,临床应用于神经介入手术的机器人包括 CorPath GRX、Magellan、VIR、RobEnt、“鲁班”和 VAS HERO 等系统,具体介绍如下。

(一) CorPath GRX 系统

CorPath GRX 系统是目前应用于临床最多的机器人系统^[9, 13-20],该系统由美国 Corindus Vascular Robotics 公司研发,最初设计也是用于经皮冠状动脉和外周血管介入治疗,目前在美国、欧盟和其他国家被批准应用于临床^[9]。CorPath GRX 系统在 Corpath 200 导引导丝和器械导管的基础上,增加了对造影导管的主动控制,提高了对复杂精细手术的完成度,目前应用该系统在全世界已经完成 8 000 余例手术,对复杂的冠状动脉介入手术的成功率可达 99.1%^[21]。临床研究表明,CorPath GRX 系统可成功完成全脑血管造影^[15, 17, 20]、颈动脉支架置入术(carotid artery stenting, CAS)^[13-16]、动脉瘤支架及血流导向装置置入术^[19]、弹簧圈栓塞术^[9]和动静脉瘘栓塞术^[17],其完成度较高且安全性较好。而且该系统可以熟练地将导丝和导管引导至靶血管^[9, 15-16, 22]。Costa 等^[20]比较了手动治疗组和机器人辅助治疗组的手术时长、对比剂使用剂量和透视时长,结果表明两组间的差异均无统计学意义。在颅内动脉瘤的治疗中,Cancelliere 等^[19]在 6 例颅内动脉瘤患者的手术中辅助应用 CorPath GRX 系统,其中置入支架 4 例,置入血流导向装置 2 例,行弹簧圈辅助栓塞治疗 3 例,该组患者术中及术后均无出血及其机器人相关并发症发生。Mendes Pereira 等^[9]对 1 例解剖结构迂曲、靠近基底动脉顶端的高风险动脉瘤进行了机器人辅助神经介入

治疗,由 CorPath GRX 系统完成了支架置入及弹簧圈栓塞步骤,2 周后磁共振血管成像显示动脉瘤完全闭塞,说明机器人在复杂的血管环境中能够平稳、准确地辅助完成手术。CorPath GRX 系统在颈动脉支架置入中的应用也较为广泛,该系统可以展开和取出远端的栓塞保护装置^[13-16]、导引血管成形术的球囊和支架^[13-16]。Weinberg 等^[16]比较了人工操作和 CorPath GRX 系统进行的 CAS,结果显示透视时长、对比剂的剂量、辐射暴露、导管更换、并发症及病死率的差异均无统计学意义,说明该系统进行 CAS 具有较高的可行性和安全性。除了以上常见的神经介入手术,CorPath GRX 系统还被应用于硬脑膜动静脉瘘的栓塞^[17]和横窦支架的置入术中^[20],术后均无并发症发生。但是,该系统也存在弊端,其在辅助神经介入治疗时可能出现卡匣和穿孔以及机械臂无法可靠地管理相关微导管和微型导丝等情况。针对以上问题,Britz 等^[23]改良了相对于微导管自动操纵导丝的主动器械固定控制软件和适用于神经介入器械的驱动盒,可以在不改变导丝位置的情况下移动微导管,提高了该系统在精细和曲折的神经血管环境中的实用性。另外,CorPath GRX 系统可以完成导丝或导管的推进、导引及充盈球囊、导引及展开支架或血流导向装置、放置弹簧圈以及展开和取出远端的栓塞保护装置,基本可以完成神经介入治疗的所有操作,但球囊扩张或支架置入手术均是采用机器人与人工操作相互配合的方式完成^[9, 13-17, 19]。总之,该系统应用广泛,但仍然存在一定的局限性,如缺乏力反馈、只能通过视觉反馈来调节等。

(二) Magellan 系统

Magellan 系统的应用较为广泛,由美国 Hansen Medical 公司研制,是首个用于外周血管介入的商用机器人系统,目前已经通过欧盟 CE 和美国食品药品监督管理局(FDA)的认证,并且已在临床辅助治疗了 1 000 余例患者,其术式包括 CAS、主动脉瘤修复术、外周动脉血管成形术和静脉手术^[24]。Vuong 等^[25]首次将 Magellan 系统应用于神经介入手术中,并完成了 9 例全脑血管造影和 18 例神经介入手术,该机器人主要负责将导丝及导管导引至靶区位置,其余手术操作均由手动完成。以上结果证明,该机器人系统辅助脑血管造影和神经介入手术的技术可行,不会明显增加患者的风险。Jones 等^[22]采用 Magellan 系统完成了 13 例颈动脉支架置入术,术中穿过病变血管均在机器人控制下完成,且用时不超过 2 min,术后未出现神经系统并发症且无支架再狭窄的发生。术中为了成功放置支架,Magellan 系统在递送导管系统中增加了导丝递送模块,在递送导丝的同时可以完成导管的递送。该系统在导管头端设有控制偏转的装置,除了线性和旋转运动外还增加了额外的自由度。虽然该系统在神经介入手术中的辅助应用安全、可行,但是因为商业因素(研发公司被其他公司收购)导致其发展停滞。

(三) VIR 系统

VIR 系统是由北京航空航天大学和日本国立香川大学共同合作研发并成功应用于动物实验的机器人系统,在获得

医学伦理委员会的批准后,该机器人被用于临床治疗^[26]。有研究认为,VIR-2 系统较 VIR 系统具有更高的灵活性和刚度,并成功完成了 15 例脑血管造影^[26]。VIR-2 具有三维导航系统,能结合视觉定位和血管造影的三维血管图像在短时间内完成重建,可立体展现导航的过程;而且安装在导管前端的力觉传感器十分微小,能够高精度(1 mm)反馈与血管触碰的信息,增加了手术的安全性^[27]。但是,近年来关于该系统的应用报道较少。

(四) RobEnt 系统

RobEnt 系统是由北京理工大学研制的主从式心脑血管介入手术机器人系统。Jiang 等^[28]应用 RobEnt 系统完成了 5 例全脑血管造影,该机器人将导管和导丝导引至靶血管,其手术时长与人工操作手术时长的差异无统计学意义。该机器人系统配备了导管和导丝控制器,可连续调节导丝和导管前进、后退和旋转的速度和精度,使导管和导丝可以同时协同操作,与手工操作相比,RobEnt 系统具有更好的准确性和稳定性,可满足临床神经血管介入手术的要求。另外,该系统具有触觉反馈系统,术者可以感知操作手柄上导管和导丝的阻力。RobEnt 系统的机械手可通过一条轨道上的多个平台连接块进行工作,该平台连接块用于固定导管控制器或导丝控制器,并控制导管和导丝在单一轨道上的轴向运动。由于使用在同一轨道上运行的多个滑块,每个滑块的运行距离一致,所以提高了介入手术或血管造影的安全性和可操作性。通过既往的临床试验表明,该系统在神经介入手术中也表现出较高的可行性和安全性^[28]。

(五)“鲁班”系统

“鲁班”系统是由首都医科大学附属北京天坛医院联合北京理工大学共同研发,是一款具有完全自主知识产权的微创血管介入手术机器人系统。2019 年 12 月,首都医科大学附属北京天坛医院远程遥控“鲁班”机器人完成了我国首例全脑血管造影。该系统研发了直推式非固连传动技术和模块化隔离与灭菌技术,使无菌操作达到了更高的标准。导丝递送装置采用大扭矩设计,使其扭矩力增加了 10 余倍;其递送装置选取新型的柔性材料,最大限度地避免了破坏导丝表面的超滑涂层;该系统还解决了机器人无法全程辅助和微细导丝操控性差等问题。目前,该机器人的临床应用正在有序推进。

(六) VAS HERO 系统

VAS HERO 系统是由北京万思医疗科技有限公司自主研发的脑血管介入手术辅助操作系统,于 2023 年 3 月正式通过国家药品监督管理局审查,是国际上首个获批的脑血管介入机器人。目前,该系统已经完成了 260 例多中心临床试验,手术成功率高达 100%,无相关并发症发生。VAS HERO 系统以毫米级别的运动能力实现了高精度的定位移动,可模拟完成导丝导管的夹持、递送旋转、液体注射等在内的神经介入常用操作技术,手术的整个流程均可由机器人完成。

二、神经介入机器人极具前景的技术

(一) 磁导航系统

在神经介入手术中,微导丝的作用是到达靶区病变后放

置微导管、支架等装置。当微导丝通过狭窄且弯曲的路径时,难以到达大脑动脉的远端分支,并且常用的尖端预定形状也可能在血管内变形。而磁场可以在不伤害人体正常组织的情况下对体内的金属或磁性物质产生力的作用。因此,血管介入的操控可以通过磁场完成,磁导航可以通过外部磁场而改变血管中导丝或导管的前进方向。其中 Niobe 系统是最具代表性的磁导航系统,2003 年由美国 Stereotaxis 公司研发,目前广泛应用于心脏消融手术中。升级版 Genesis RMN 系统于 2019 年问世,并于 2020 年由美国 FDA 获批上市,该系统较 Niobe 系统的速度提升了 70%,其体积缩小了 40%,具有轻便、灵活的特点,主要应用于心脏消融手术,目前尚未应用于神经介入手术的研究。瑞士 Nanoflex Robotics 公司设计了一款利用磁导航系统精确地将磁性导管插入患者大脑深处的机器人系统(简称 Nanoflex 机器人系统),该系统的导管的管头可以向任意方向弯曲,比现有的导管更柔软、更易操作、安全性更高,其磁场发生器为可移动设备,可根据需要推进手术室,应用范围较广。Nanoflex 机器人系统计划于 2023 年第三季度进行首次人体试验并向美国 FDA 提交了使用申请。在现有的报道中, Kim 等^[4]研发了一种基于磁操纵的远程操作机器人神经介入平台,该机器人臂可精准控制复杂神经系统中磁性可操纵的软连续导丝,其具有附接到末端执行器的致动磁体,由操作者远程控制,以施加磁性导丝的致动和转向所需的磁场,并在不同分支的脑动脉模型和猪脑动脉中进行手术实验,其在体内导引狭窄和弯曲通道时表现出卓越的能力。

(二) 力反馈系统

导管微小力实时检测以及从控制器至操作者精准的触觉反馈可降低手术损伤的可能性^[29]。美国强生公司研发的 Sensei X2 手术机器人系统是在 Sensei X1 系统的基础上增加了触觉力反馈,并采用了瑞士 Force Dimension 公司研发的 Omega 系列触觉反馈装置,该装置的 Omega 3、Omega 6 和 Omega 7 分别有 3、6 和 7 个自由度,在三维空间的多个方向具有传递力的作用,但需要特殊的头端装置。Wang 等^[30]使用电机提供排斥力并实现力反馈作用,但由于反冲和分辨率的问题,基于电机的触觉反馈系统在描述血液黏稠度方面存在弱点。Miyachi 等^[31]将测量拉力或推力的传感器安装在微导丝线性马达制动器的最尾端,用来测量微导丝受到的阻力,采用力传感器的电压表示微导丝的推力,并且在神经血管模型介入手术中进行实验,结果显示微导丝可成功、稳定地插入动脉瘤内,但安装在尾端的传感器受导丝和导管力传递的影响,其准确度要低于头端传感器。除了基于传感器的力测量方法外,有研究还提供了基于模型的力测量,通过结合传感器的边界条件、实时成像、血管解剖学和设备模型计算和估计模型中设备的力量^[32]。还有研究利用新的智能材料来产生触觉反馈,如 Li 等^[33]设计了一种基于水凝胶和磁流变流体的磁控触觉力反馈结构,可以为术者提供稳定的力反馈作用。Braue 等^[34]将形状记忆合金的形状记忆效应和线性制动特性用于触觉反馈,当受到外部电场的作用时,电

流变流体的流变特性会发生显著且可逆的变化,可通过多自由度控制手柄传递给术者。尽管如此,高精度力反馈的实施仍然是神经介入机器人的一个具有挑战性的研究领域。

(三) 导管或导丝的推进装置

神经介入机器人需要模拟术者的食指和拇指进行导丝、导管、支架和球囊的递送,从而将其安全引导至靶区位置,机器人至少需要完成 3 个动作,即夹紧、平移和旋转血管内的工具。CorPath GRX 系统采用摩擦轮与旋转轮相结合的方法完成 2 个自由度导丝或导管的运动^[21]。Magellan 系统使用摩擦轮的旋转和轴向结构进行导丝或导管的递送^[24]。“鲁班”系统采用 2 个滑块分别模拟人的左手和右手,第一个滑块通过导轨上的拖曳机构来左右推送导管;另一个滑块模拟人手进行往复操作。该系统同时研发了新的导管支撑装置,在保证导管表面不受损伤的同时,解决了推送时导管中段不可控的问题,完成了全国首例全脑血管造影。海军军医大学附属第一医院与上海交通大学团队联合研发了“V”型夹持装置,该装置适用于所有品牌、型号的血管内介入材料,且可以自动对准中心,同时采用多个机械手协同操作,完成类似术者手部的捻转运动,配有适合于导丝长度的直线导轨,可以使导丝或导管一次到达靶区位置^[35]。尽管如此,机器人依然不能完全模拟人工操作时往复推进导丝或导管的模式。

三、展望

神经介入机器人是一个快速发展、技术驱动领域,目前已经达到半自主精准手术的水平,但对于复杂手术仍无法取代人工操作。随着机械学、材料学、生物力学、计算机学和信息学等学科的发展及相互交融,远程、精准的全流程手术在未来将得以实现。随着新型材料的不断涌现、血管内操作技巧的逐渐成熟以及磁流变及电流变流体的应用,可为实现力学的精准反馈提供新的思路。三维成像导航可大大提高手术精度,磁共振导航应用于神经介入机器人也有望实现。同时,网络的急速发展也有利于加速信号的传输^[36],远程神经介入手术有望让偏僻地区的患者得到更优质的医疗资源。目前,神经介入机器人仍处于不断改进、迭代发展的时期,未来可为患者提供更加安全、有效、精确的医疗服务。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] Musmar B, Adeeb N, Ansari J, et al. Endovascular management of hemorrhagic stroke [J]. *Biomedicines*, 2022, 10 (1): 100. DOI: 10.3390/biomedicines10010100.
- [2] Lamanna A, Maingard J, Barras CD, et al. Carotid artery stenting: current state of evidence and future directions [J]. *Acta Neurol Scand*, 2019, 139 (4): 318-333. DOI: 10.1111/ane.13062.
- [3] Munich SA, Vakharia K, Levy EI. Overview of mechanical thrombectomy techniques [J]. *Neurosurgery*, 2019, 85 (suppl_1): S60-S67. DOI: 10.1093/neuros/nyz071.
- [4] Kim Y, Genevriere E, Harker P, et al. Telerobotic neurovascular interventions with magnetic manipulation [J]. *Sci Robot*, 2022, 7 (65): eabg9907. DOI: 10.1126/scirobotics.abg9907.
- [5] Rajaraman P, Doody MM, Yu CL, et al. Cancer risks in U. S. Radiologic technologists working with fluoroscopically guided

- interventional procedures, 1994-2008 [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2016, 206 (5): 1101-1108; quiz 1109. DOI: 10.2214/AJR.15.15265.
- [6] Andreassi MG, Piccaluga E, Gargani L, et al. Subclinical carotid atherosclerosis and early vascular aging from long-term low-dose ionizing radiation exposure: a genetic, telomere, and vascular ultrasound study in cardiac catheterization laboratory staff [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2015, 8(4): 616-627. DOI: 10.1016/j.jcin.2014.12.233.
- [7] Kiwan R, Jukes A, Mayich M, et al. A protocol for carotid artery stenting in COVID times. A single canadian centre experience [J]. *Can J Neurol Sci*, 2022, 49(3): 361-363. DOI: 10.1017/cjn.2021.105.
- [8] Miyachi S, Nagano Y, Kawaguchi R, et al. Remote surgery using a neuroendovascular intervention support robot equipped with a sensing function: experimental verification [J]. *Asian J Neurosurg*, 2021, 16(2): 363-366. DOI: 10.4103/ajns. AJNS_77_21.
- [9] Mendes Pereira V, Cancelliere NM, Nicholson P, et al. First-in-human, robotic-assisted neuroendovascular intervention [J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12 (4): 338-340. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-015671. rep.
- [10] Albuquerque FC, Hirsch JA, Chen M, et al. Robotics in neurointervention: the promise and the reality [J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12 (4): 333-334. DOI: 10.1136/neurintsurg-2020-015955.
- [11] 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.
- [12] Mahmud E, Schmid F, Kalmar P, et al. Feasibility and safety of robotic peripheral vascular interventions: results of the RAPID trial [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2016, 9 (19): 2058-2064. DOI: 10.1016/j.jcin.2016.07.002.
- [13] George JC, Tabaza L, Janzer S. Robotic-assisted balloon angioplasty and stent placement with distal embolic protection device for severe carotid artery stenosis in a high-risk surgical patient [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2020, 96(2): 410-412. DOI: 10.1002/cd.28939.
- [14] Nogueira RG, Sachdeva R, Al-Bayati AR, et al. Robotic assisted carotid artery stenting for the treatment of symptomatic carotid disease: technical feasibility and preliminary results [J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12 (4): 341-344. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-015754.
- [15] Sajja KC, Sweid A, Al Saiegh F, et al. Endovascular robotic: feasibility and proof of principle for diagnostic cerebral angiography and carotid artery stenting [J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12 (4): 345-349. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-015763.
- [16] Weinberg JH, Sweid A, Sajja K, et al. Comparison of robotic-assisted carotid stenting and manual carotid stenting through the transradial approach [J]. *J Neurosurg*, 2020, 135 (1): 21-28. DOI: 10.3171/2020.5. JNS201421.
- [17] Desai VR, Lee JJ, Sample T, et al. First in man pilot feasibility study in extracranial carotid robotic-assisted endovascular intervention [J]. *Neurosurgery*, 2021, 88 (3): 506-514. DOI: 10.1093/neuros/nyaa461.
- [18] Abbas R, Al Saiegh F, El Naamani K, et al. Robot-assisted carotid artery stenting: outcomes, safety, and operational learning curve [J]. *Neurosurg Focus*, 2022, 52 (1): E17. DOI: 10.3171/2021.10. FOCUS21504.
- [19] Cancelliere NM, Lynch J, Nicholson P, et al. Robotic-assisted intracranial aneurysm treatment: 1 year follow-up imaging and clinical outcomes [J]. *J Neurointerv Surg*, 2022, 14 (12): 1229-1233. DOI: 10.1136/neurintsurg-2021-017865.
- [20] Costa M, Tatarzyn Z, Alobaid A, et al. Robotically-assisted neuro-endovascular procedures: single-center experience and a review of the literature [J]. *Interv Neuroradiol*, 2023, 29 (2): 201-210. DOI: 10.1177/15910199221082475.
- [21] 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.
- [22] Jones B, Riga C, Bicknell C, et al. Robot-assisted carotid artery stenting: a safety and feasibility study [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2021, 44 (5): 795-800. DOI: 10.1007/s00270-020-02759-0.
- [23] Britz GW, Panesar SS, Falb P, et al. Neuroendovascular-specific engineering modifications to the CorPath GRX robotic system [J]. *J Neurosurg*, 2019, 133 (6): 1830-1836. DOI: 10.3171/2019.9. JNS192113.
- [24] Lumsden AB, Bismuth J. Current status of endovascular catheter robotics [J]. *J Cardiovasc Surg (Torino)*, 2018, 59 (3): 310-316. DOI: 10.23736/S0021-9509.18.10447-2.
- [25] Vuong SM, Carroll CP, Tackla RD, et al. Application of emerging technologies to improve access to ischemic stroke care [J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(4): E8. DOI: 10.3171/2017.1. FOCUS16520.
- [26] Lu WS, Xu WY, Pan F, et al. Clinical application of a vascular interventional robot in cerebral angiography [J]. *Int J Med Robot*, 2016, 12(1): 132-136. DOI: 10.1002/res.1650.
- [27] 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(3): 16-18.
- [28] Jiang Y, Liu K, Li Y. Initial clinical trial of robot of endovascular treatment with force feedback and cooperating of catheter and guidewire [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2018, 2018: 9735979. DOI: 10.1155/2018/9735979.
- [29] Peters BS, Armijo PR, Krause C, et al. Review of emerging surgical robotic technology [J]. *Surg Endosc*, 2018, 32 (4): 1636-1655. DOI: 10.1007/s00464-018-6079-2.
- [30] Wang K, Liu J, Yan W, et al. Force feedback controls of multi-gripper robotic endovascular intervention: design, prototype, and experiments [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2021, 16(1): 179-192. DOI: 10.1007/s11548-020-02278-w.
- [31] Miyachi S, Nagano Y, Hironaka T, et al. Novel operation support robot with sensory-motor feedback system for neuroendovascular intervention [J]. *World Neurosurg*, 2019, 127: e617-e623. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.03.221.
- [32] Hasanazadeh S, Janabi-Sharifi F. Model-based force estimation for intracardiac catheters [J]. *IEEE-Asme T Mech*, 2016, 21(1): 154-162. DOI: 10.1109/TMECH.2015.2453122.
- [33] Li X, Guo S, Shi P, et al. An endovascular catheterization robotic system using collaborative operation with magnetically controlled haptic force feedback [J]. *Micromachines (Basel)*, 2022, 13(4): 505. DOI: 10.3390/mi13040505.
- [34] Braun D, Weik D, Elsner S, et al. Position control and force estimation method for surgical forceps using SMA actuators and sensors [J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(17): 5111. DOI: 10.3390/ma14175111.
- [35] 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.
- [36] 乔梁, 遇涛, 李勇杰. 手术机器人在神经外科中的应用现状 [J]. *中华神经外科杂志*, 2020, 12(36): 1286-1289. DOI: 10.3760/cma. j. cn112050-20200825-00468.

(收稿: 2023 - 05 - 16 修回: 2024 - 01 - 17)

(本文编辑: 刘岩红)