

基于医工融合的高端医疗装备研究进展

姚佳烽,邓琪,刘凯

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:随着多学科之间的相互渗透,基于医工融合的医疗装备的开发和应用已成为现代医学的发展趋势,对医疗技术的进步产生重要影响。对基于医工融合的高端医疗装备展开综述,主要论述医学电阻抗设备和医疗机器人的研究现状,并对其研究趋势进行分析和预测。

关键词:医工融合;高端医疗装备;电阻抗;医疗手术机器人;医疗康复机器人

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0001-04

Research Progress of High-end Medical Equipment Based on Medical Engineering Integration

YAO Jiafeng, DENG Qi, LIU Kai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the mutual penetration of multiple disciplines, the development and application of medical equipment based on medical engineering integration has become the development trend of modern medicine and has an important impact on the progress of medical technology. This paper summarizes the high-end medical equipment based on medical industrial integration, mainly discusses the research status of medical electrical impedance equipment and medical robot, and analyzes and forecasts their research trends.

Keywords: medical engineering integration; high-end medical equipment; electrical impedance; medical surgical robot; medical rehabilitation robot

0 引言

随着人类社会的不断进步,人们对健康的需求日益提高,从而驱动医疗技术向前发展。医疗技术的研究是一个全球性的复杂问题,涉及到多个学科领域的知识,仅靠传统单一学科的医学研究难以取得较大的突破。因此,基于学科交叉^[1-2]的医工融合技术的价值不断凸显,已经成为现代医学发展的新方向。

医工融合是指基于医学和工程学科之间的交叉融合、优势互补、相互渗透、协同创新来解决医学健康领域的相关问题。医工融合技术在20世纪已经得到国内外学者的关注。世界上例如哈佛大学、斯坦福大学等一些顶级名校早在20世纪70年代就开展医工结合学科的研究,并成立了相关的研究所和研究中心^[3]。国内对医工结合的研究兴起于20世纪80年代末期,许多重点学校例如清华大学、北京大学、上海交通大学、东南大学、哈尔滨工业大学、

西安交通大学、同济大学、北京航空航天大学、天津大学等纷纷建立了基于医工融合的交叉学科研究所^[4],为医工融合的发展提供了一个广阔的平台。

目前,随着医学与计算机、机械、电气等学科深度融合,高端医疗装备被不断地研究和开发,为医学临床的诊断技术、治疗技术和康复技术提供了新设备、新方法,对医学的发展具有重要的意义。本文对一些基于医工融合的高端医疗装备进行论述,主要介绍了医学电阻抗设备、医疗手术机器人以及医疗康复机器人的研究现状和研究趋势。

1 医学电阻抗设备的研究现状

电阻抗是一个公认的物理概念,在这个概念中,可以通过测量物体电学特性以评估其组成成分。由于电阻抗技术具有简单、无创、快速、便携、可重复等优点^[5],在过去30年的时间里,逐渐被应用到医学领域当中^[6],基于电

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62071224)

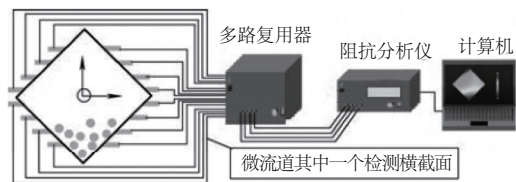
第一作者简介:姚佳烽(1984—),男,河南巩义人,副教授,硕士生导师,博士,日本学术振兴会(JSPS)研究员,日本千叶大学客座研究员,江苏省留学回国创新创业人才,南京留学人员科技创新人才,国际工业过程层析成像学会(ISIPT)会员,IEEE会员,中国航空学会会员,中国生物医学工程学会会员。主持国家自然科学基金(2项)、国家自然科学基金委员会与英国皇家学会合作交流项目、江苏省自然科学基金、江苏省留学回国创新创业项目、江苏省科技成果转化专项、南京留学人员科技创新项目等20余项科研项目。2019年获批第四批“江苏省外国专家工作室”。2019年获得江苏省科学技术奖二等奖。担任国际期刊《Acta Translational Medicine》副主编;担任国内期刊《医学创新与应用》副主编,担任《Journal of Healthcare Engineering》客座主编。共发表学术期刊论文80余篇,其中SCI收录60余篇;出版日文专著章节1部,英文专著章节1部;申请发明专利20余项,授权5项。

阻抗技术的先进医疗设备被不断地开发出来。

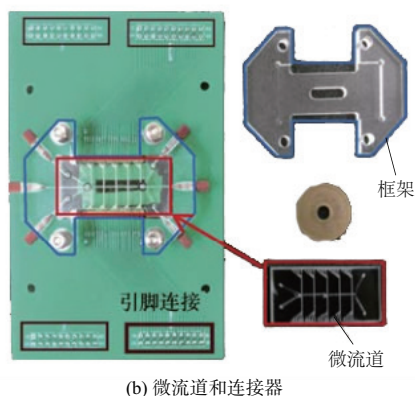
1.1 基于电阻抗断层成像技术的医疗设备研究现状

电阻抗断层成像(EIT)技术^[7-9]是一种非侵入性成像技术^[10],在医学成像领域有着广泛的研究前景^[11]。电阻抗断层成像的原理是借助一组电极按照特定的驱动测量模式重建测量场中的电导率分布或电导率变化^[7],根据这一原理,可以利用 EIT 技术研究人体内电导率的变化,进而根据人体内电导率的变化推断出人体的生理状态^[12]。由于电阻抗断层成像技术具有无创、无危害、结构简单、成本低等优点^[11],在医学成像领域受到了很多研究学者的关注。

2019年,姚佳烽等^[13]开发了开发一套 μ EIT 系统,用来对微流道中细胞溶液的细胞位置分布进行成像,如图 1 所示。该装置的开发实现了细胞在流动过程中的可视化监测,为肿瘤细胞分离效果的检测提供了新的方法和思路。



(a) 细胞电阻抗成像装置示意图



(b) 微流道和连接器

图 1 装置示意图和微流控芯片

2021年,RANDAZZO A等^[14]提出了一种用于脑卒中监测的 EIT 成像设备,所提出的设备能够有效地检测头部模型内不同尺寸和位置的夹杂物。该设备的研发有望实现中风类型的早期检测,有利于脑卒中的正确治疗。

2021年,姚佳烽等自主研发了用于肺检测的床旁无辐射实时电阻抗成像设备,如图 2 所示。该设备包含嵌入式硬件系统、人工智能成像算法的软件系统、触屏人机交互界面 HMI 和基于大数据云服务的长期健康管家系统。该设备相较于临床上常用的 X 线胸片、CT 等检查具有无辐射、便携性高和功能性成像等优点,可以辅助医生实时掌握患者的肺部通气状况,对于个性化调整呼吸康复方案,具有重要的临床意义。

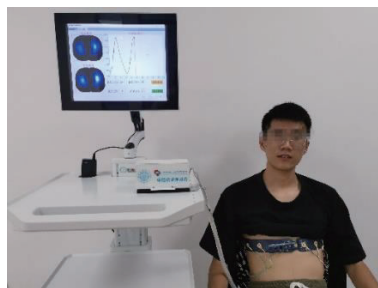


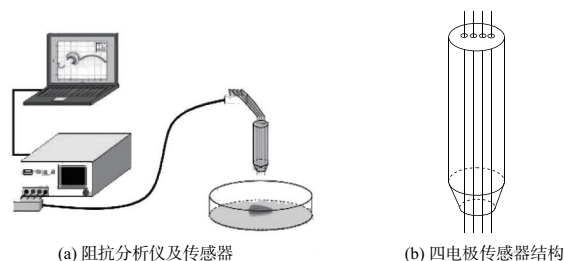
图 2 用于肺检测的电阻抗成像设备

EIT 成像技术凭借其无创、无辐射等优势,在医学成像领域已经得到很多学者的研究认可,基于 EIT 成像技术的先进医疗设备不断开发和应用,弥补了现有的医学成像设备有辐射、不便携等缺陷,是医学影像技术一个重要发展。

1.2 基于生物电阻抗谱技术的医疗设备的研究现状

生物电阻抗谱(BIS)^[15-16]技术是一种利用不同频率下生物组织的电阻抗特性来推测相应的生理信息的技术^[17]。由于生物电阻抗谱(BIS)系统干扰小、过程信息全面、结果可靠等优点在医疗检测领域得到了广泛的应用^[18]。近年来,许多基于 BIS 技术的生物医学检测设备不断地被开发出来。

2021年,姚佳烽等^[19]研发了用于舌体肿瘤组织识别的 BIS 设备,设备的结构如图 3 所示。该设备用生物电阻抗谱的方法对其正常组织区域、混有肿瘤组织区域及肿瘤组织区域进行了电学特性研究,成功地识别出肿瘤组织所在的区域,为主刀医生彻底切除舌体肿瘤提供了一种新的检测方法。



(a) 阻抗分析仪及传感器

(b) 四电极传感器结构

图 3 BIS 检测仪器

2021年,LI J P等^[20]设计了用于红细胞沉降检测的 EIS 装置,如图 4 所示。该装置克服了传统的红细胞沉降检测耗时长的缺点,可用于实时快速地检测红细胞的沉降。这项研究为血液沉降检测提供了一种新的设备,有利于临床上多种疾病的检测与诊断^[21-23]。

生物电阻抗谱技术以其快速、非侵入、便携性好等优点在医学检测领域得到广泛的研究,基于生物电阻抗谱技术的医疗设备的研发和应用,是医学检测设备的一大进步。

2 医疗机器人研究现状

医疗机器人是医工融合的典型设备,其研究领域涉及

到医学、生物学、计算机技术、网络通信技术和机械等多个学科。医疗机器人的研究和应用对医疗技术的发展具有重要意义。医疗手术机器人和医疗康复机器人是医疗机器人中两种常见的类型。

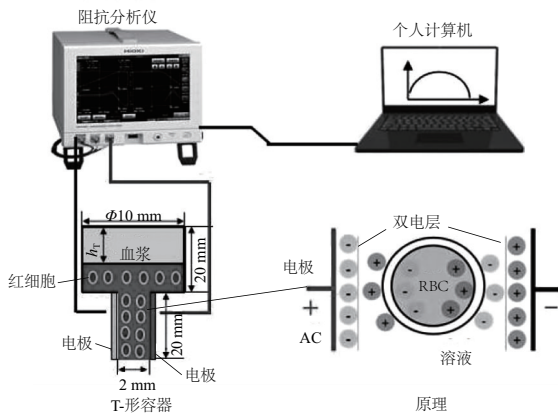


图4 红细胞沉降检测设备结构图

2.1 医疗手术机器人

与传统的手动手术相比,用机器人辅助外科手术具有很多的优势。第一,在机器人辅助的手术中,可以避免因外科医生的手部震颤而影响手术效果^[24];第二,由于手持手术器械的灵活度有限,难以精确地控制器械灵巧地操作,从而会增加患者的疼痛、出血和手术切口的大小,而手术机器人可以有效地克服这个缺点^[25]。此外,在一些高精度的手术过程中,使用传统的手动手术容易出现手术的失误,而利用手术机器人就不会出现这种情况。正因为手术机器人的诸多优势,一直受到很多学者的关注。

近年来,微创手术(MIS),由于具有恢复时间短、疤痕小等潜在优势在实践中被广泛用于执行不同的医疗程序^[26]。但是,由于微创手术的切口小,工作区域受限^[27],很难利用传统手术来实现。为了解决这些问题,一些用于微创手术的机器人被研发和应用^[28]。但是由于现有的微创外科手术(MIS)机器人体积大、结构复杂、价格昂贵,大大增加了手术成本,限制了MIS机器人技术的应用。因此,小型化和便携化逐渐成为MIS机器人研究的一个重要方向。2020年,ZHANG H F等^[25]设计了一款新型MIS机器人,该微创手术机器人将传统微创技术的高效性与机器人操作的灵巧性相结合,解决了现有主从式MIS机器人体积大、质量重的问题以及现有手持机器人直观可操作性差的问题。

随着计算机技术和网络通信技术的发展,远程手术机器人逐渐发展起来。远程手术机器人的应用可以有效解决医疗资源分布不均匀的问题。此外,在例如地震、战场或射线等手术环境中,使用远程手术机器人协助对患者进行治疗,可以防止医生受到伤害^[29]。近年来,相关研究人员对远程手术机器人进行了广泛的研究。2019年6月,世界首例基于5G网络的“一对多”远程骨科机器人手术在北京积水潭医院完成,身在北京的骨科专家同时为山东和浙江的两位患者进行了手术,这次尝试进一步发展了远

程手术、远程医疗的形式^[30]。同年9月,全军肝胆外科研究所与康多机器人公司合作,完成了全球首例多点协同5G远程多学科机器人手术试验,并且成功地对动物实施了胃肠切除和肝切除^[31],为远程手术机器人的发展奠定了技术基础。

医疗手术机器人的应用是外科手术的一个重大进步,对于提高手术精准性、节省外科医生体力等方面具有重大意义。

2.2 医疗康复机器人

中风是21世纪最常见的神经系统疾病之一^[32],中风的患者往往会患有行动不便、运动障碍和认知障碍,这些患者都需要专业人员为其做特殊护理。由于老龄化现象的日益严重,中风的患者数量会日益增多,医疗系统将无法为每一位中风的患者提供特殊护理。医疗康复机器人可以帮助中风的患者进行运动训练和康复训练,可以有效解决医疗系统中康复师短缺的问题^[33],成为近年来医疗机器人领域的研究热点。

运动康复机器人是康复机器人的一种类型,可以帮助运动功能障碍的患者进行骨骼、肌肉和关节的训练,以恢复或改善其运动功能。2021年,MENG Q L等^[34]将末端执行器型机器人与外骨骼型机器人相结合,提出了一种新型基于末端执行器的4自由度空间训练上肢康复机器人,如图5所示。该机器人可协助人类上肢进行肩关节屈曲、伸展、内收、外展和肘关节屈曲、伸展的康复训练。同年,OYMAN E L等^[35]提出了一种电缆驱动康复机器人的设计和控制,该机器人可以很容易地配置为在不需要任何矫形器的情况下锻炼不同的关节,如肘部、肩部、臀部、膝盖和脚踝。

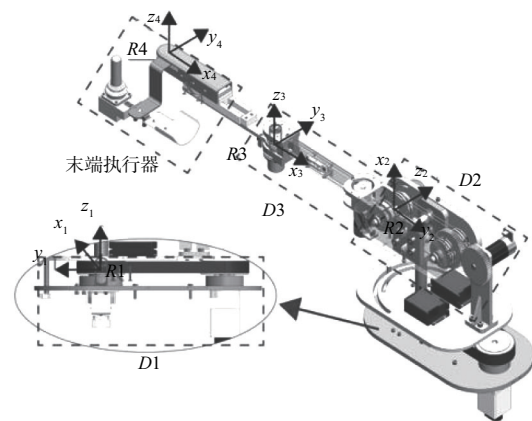


图5 基于末端执行器的上肢康复机器人的结构

认知障碍机器人是康复机器人的另一种类型。认知障碍康复机器人可以通过一些与运动相关的刺激与患者进行交互,增强患者对环境的感知,从而恢复患者的认知能力^[36]。2012年,KUBOTA N等^[37]为单侧空间忽视患者开发了CRT机器人。该机器人基于3D距离图像传感器,可以观察人体运动。观察到的数据可以为治疗师提供重要信息,以显示康复状态。2018年,ANDRIELLA A等^[38]开发了一个嵌入机器人的决策系统,该机器人可以与认知

功能障碍的患者建立有效的互动,护理者可以利用该系统在进行认知训练时激励和支持患者。

医疗康复机器人的研究和应用是临床康复技术的一个重大进步,对于行动不便、运动障碍或者认知障碍患者的康复治疗具有很大的帮助,有着广阔的研究前景。

3 高端医疗装备的研究趋势

历经多年的发展,基于医工融合的高端医疗装备得到了广泛的应用,在医学成像、临床检测、治疗和康复等领域扮演着越来越重要的角色。但是现有的医疗装备仍然存在着尚未解决的问题。

医学电阻抗设备目前在临床应用中存在众多的影响因素,例如在采集人体组织的阻抗信息时易受到体位、摄入食物量、体脂含量等因素的影响^[39]。如何解决医学电阻抗设备的检测结果易受影响因素干扰的问题,仍然需要相关科研人员的进一步研究。

现有的医疗机器人仍然只是起到辅助作用,不能在没有医生参与的情况下独立完成病人的手术和康复过程。实现医疗机器人的自动化、智能化是医疗机器人未来的研究方向。

4 结语

随着科技的进步、学科交叉的逐渐深入,基于医工融合的先进医疗设备受到了广泛的研究,并且已经取得了研究成果。本文主要对医学电阻抗设备、医疗机器人的研究现状进行了简要论述,并对未来的研究趋势进行了分析,为相关领域的研究人员提供一个参考,有利于其未来的研究工作。

参考文献:

[1] ALVARADO M, LUCCI A, MANDERS J. Best practices for multidisciplinary integration of a DCIS genomic assay into clinical practice[J]. *Journal of Surgical Oncology*, 2017, 116(8): 1016-1020.

[2] 李荔敏,廖渝,孙道恒,等. 国家自然科学基金助力厦门大学交叉学科发展:以工程与材料学科为例[J]. *中国科学基金*, 2016,30(5):459-463.

[3] CIARROCCHI A, RINDI G, PIETROLETTI R. Diagnosis and treatment of primary tumors of the appendix: a critical review[J]. *Journal of Gastrointestinal Cancer*, 2021,52(2):471-475.

[4] 王燕敏,许鑫,田苗. 地方高校“医工结合”改革的冷思考[J]. *华北理工大学学报(社会科学版)*, 2021,21(2):99-103.

[5] BRUNANIA, PERNA S, SORANNA D, et al. Body composition assessment using bioelectrical impedance analysis (BIA) in a wide cohort of patients affected with mild to severe obesity[J]. *Clinical Nutrition*, 2021,40(6):3973-3981.

[6] PATHIRAJA A A, WEERAKKODY R A, VON ROON A C, et al. The clinical application of electrical impedance technology in the detection of malignant neoplasms: a systematic review[J]. *Journal of Translational Medicine*, 2020,18(1):227.

[7] YANG L, WU H T, LIU K, et al. Image reconstruction improvement with optimal driven-measurement pattern selection for electrical impedance tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*,

2021,21(12):13530-13539.

[8] WU Y, CHEN B, LIU K, et al. Shape reconstruction with multiphase conductivity for electrical impedance tomography using improved convolutional neural network method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021,21(7):9277-9287.

[9] WANG H, LIU K, WU Y, et al. Image reconstruction for electrical impedance tomography using radial basis function neural network based on hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021,21(2):1926-1934.

[10] REN S J, SOLEIMANI M, XU Y Y, et al. Inclusion boundary reconstruction and sensitivity analysis in electrical impedance tomography[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2018,26(7):1037-1061.

[11] YAO J F, TAKEI M. Application of process tomography to multiphase flow measurement in industrial and biomedical fields: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(24): 8196-8205.

[12] XU Z F, YAO J F, WANG Z, et al. Development of a portable electrical impedance tomography system for biomedical applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(19): 8117-8124.

[13] 姚佳烽,刘夏移,徐梓菲,等. 基于微流控芯片的生物细胞电阻抗成像检测技术[J]. *机械工程学报*, 2019,55(2):1-9.

[14] RANDAZZO A, TAVANTI E, MIKULENAS M, et al. An electrical impedance tomography system for brain stroke imaging based on a lebesgue-space inversion procedure[J]. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2021,5(1):54-61.

[15] WANG L, HU S P, LIU K, et al. A hybrid Genetic Algorithm and Levenberg-Marquardt (GA-LM) method for cell suspension measurement with electrical impedance spectroscopy[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020,91(12):124104.

[16] 姚佳烽,万建芬,杨璐,等. 基于生物阻抗谱的细胞电学特性研究[J]. *物理学报*, 2020,69(16):90-97.

[17] BERA T K, NAGARAJU J, LUBINEAU G. Electrical impedance spectroscopy (EIS)-based evaluation of biological tissue phantoms to study multifrequency electrical impedance tomography (Mf-EIT) systems[J]. *Journal of Visualization*, 2016,19(4):691-713.

[18] YAO J F, WANG L, LIU K, et al. Evaluation of electrical characteristics of biological tissue with electrical impedance spectroscopy[J]. *Electrophoresis*, 2020,41(16/17):1425-1432.

[19] 姚佳烽,胡松佩,杨璐,等. 基于生物阻抗谱的舌体肿瘤组织识别方法[J]. *物理学报*, 2021,70(15):358-364.

[20] LI J P, BRAHIM E M S, WEN J M, et al. Quantitative measurement of the erythrocyte sedimentation based on electrical impedance spectroscopy with modified HANAI theory and the multi-frequency parameter xc[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021,21(23):27084-27092.

[21] WONG R L, KORN J H. Temporal arteritis without an elevated erythrocyte sedimentation rate. Case report and review of the literature[J]. *The American Journal of Medicine*, 1986, 80(5):959-964.

[22] SAADEH C. The erythrocyte sedimentation rate: old and new clinical applications[J]. *Southern Medical Journal*, 1998, 91(3):220-225.

(下转第8页)

由图 7-图 10 可知,所设计的反步控制器可使转子的第一和第二自由度在 500 ms 左右达到稳定悬浮的状态,第三和第四自由度在 450 ms 左右达到稳定悬浮的状态,而且转子在起浮时震荡并不剧烈,基本没有超调量。

5 结语

本文针对磁轴承系统设计了一种鲁棒反步控制器,使用 Matlab/Simulink 仿真软件对设计的控制器进行仿真验证,其具备良好的响应速度和抵抗阶跃以及正弦干扰的性能,并在磁悬浮轴承试验台上进行了转子径向四自由度的起浮实验,实验表明:所设计的控制器表现出了良好的控制性能。

参考文献:

[1] 胡业发,周祖德,江征风. 磁力轴承的基础理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

- [2] SCHWEITZER G, BLEULER H, TRAXLER A. Active magnetic bearings—basics, properties and application of active magnetic bearings[M]. Switzerland: ETH, 1994.
- [3] 郭凯旋,徐龙祥. 基于 TMS320F28335DSP 的磁悬浮轴承数字控制器的研究与设计[J]. 机械制造与自动化,2018,47(4): 179-182.
- [4] 沈莹雅,张建生,张远,等. 主动磁悬浮轴承的鲁棒反演滑模控制[J]. 机械制造与自动化,2016,45(1):194-198.
- [5] 花熙文. 永磁同步电机的模糊反步自适应调速策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [6] 杨明. 船舶电力推进永磁同步电机非线性反步控制器设计与优化研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.
- [7] SADEK U, SARJAŠ A, CHOWDHURY A, et al. Improved adaptive fuzzy backstepping control of a magnetic levitation system based on symbiotic organism search [J]. Applied Soft Computing, 2017, 56: 19-33.

收稿日期:2020-12-11

(上接第 4 页)

- [23] SINGH A S, ATAM V, YATHISH B E, et al. Role of erythrocyte sedimentation rate in ischemic stroke as an inflammatory marker of carotid atherosclerosis [J]. Journal of Neurosciences in Rural Practice, 2014, 5(1): 40-45.
- [24] YOSHIMURA M, MARINHO M M, HARADA K, et al. Single-shot pose estimation of surgical robot instruments' shafts from monocular endoscopic images [C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paris, France: IEEE, 2020: 9960-9966.
- [25] ZHANG H F, LI J M, KONG K, et al. System design of a novel minimally invasive surgical robot that combines the advantages of MIS techniques and robotic technology [J]. IEEE Access, 2020, 8: 41147-41161.
- [26] LOW S C, PHEE L. A review of master - slave robotic systems for surgery [J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2006, 3(4): 547-567.
- [27] JI D, KANG T H, SHIM S, et al. Analysis of twist deformation in wire - driven continuum surgical robot [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(1): 10-20.
- [28] PETRONIG, NICCOLINI M, MENCIASSIA, et al. A novel intracorporeal assembling robotic system for single - port laparoscopic surgery [J]. Surgical Endoscopy, 2013, 27(2): 665-670.
- [29] 闫志远,梁云雷,杜志江. 远程手术机器人研究与关键技术分析[J]. 机器人技术与应用, 2020(2): 15-18.
- [30] 佚名. 世界首例多点协同 5G 远程多学科机器人手术试验成功[J]. 信息系统工程, 2019(9): 2.
- [31] TIAN W, FAN M X, ZENG C, et al. telerobotic spinal surgery based on 5G network: the first 12 cases [J]. Neurospine, 2020, 17(1): 114-120.
- [32] TUCAN P, VAIDA C, ULINICI I, et al. Optimization of the

- ASPIRE spherical parallel rehabilitation robot based on its clinical evaluation [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(6): 3281.
- [33] DURET C, GROSMOIRE A G, KREBS H I. Robot - assisted therapy in upper extremity hemiparesis: overview of an evidence - based approach [J]. Frontiers in Neurology, 2019, 10: 412.
- [34] MENG Q L, JIAO Z Q, YU H L, et al. Design and evaluation of a novel upper limb rehabilitation robot with space training based on an end effector [J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(1): 639-648.
- [35] OYMAN E L, KORKUT M Y, YLMAZ C, et al. Design and control of a cable - driven rehabilitation robot for upper and lower limbs [J]. Robotica, 2022, 40(1): 1-37.
- [36] VOGAN A A, ALNAJJAR F, GOCHOO M, et al. Robots, AI, and cognitive training in an era of mass age - related cognitive decline: a systematic review [J]. IEEE Access, 2020, 8: 18284-18304.
- [37] KUBOTA N, BOTZHEIM J, OBO T. Human motion tracking and feature extraction for cognitive rehabilitation in informationally structured space [C]//2012 9th France - Japan & 7th Europe - Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 13th Int'l Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM). Paris, France: IEEE, 2012: 464-471.
- [38] ANDRIELLA A, ALENYÀ G, HERNÁNDEZ - FARIGOLA J, et al. Deciding the different robot roles for patient cognitive training [J]. International Journal of Human - Computer Studies, 2018, 117: 20-29.
- [39] 孙中标,叶继伦,张旭,等. 生物电阻抗测量方法进展及应用 [J]. 中国医疗器械杂志, 2021, 45(3): 296-300.

收稿日期:2022-01-21