

智能针灸机器人关键技术及发展趋势

徐天成¹, 王雪军², 卢东东³, 卢梦叶¹, 林祺¹, 张小强², 成艺⁴

(1. 南京中医药大学, 江苏 南京 210029;

2. 南京理工大学, 江苏 南京 210094;

3. 中国科学院空天信息研究院, 江苏 苏州 215000;

4. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要: 针灸疗法已经在全球超过 183 个国家及地区获得广泛应用。随着机器人技术的迅猛发展, 研发智能针灸机器人成为可能, 围绕其相关核心技术进行研究, 指出穴位的自动定位及智能配穴等是智能针灸机器人研发的关键技术和难点, 并阐述了智能配穴相关研究的部分最新成果。

关键词: 医疗机器人; 人工智能; 针灸治疗

中图分类号: R246.9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201918

Developing trend and key technical analysis of intelligent acupuncture robot

XU Tiancheng¹, WANG Xuejun², LU Dongdong³, LU Mengye¹, LIN Qi¹, ZHANG Xiaoqiang², CHENG Yi⁴

1. Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210029, China

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

3. Aerospace Information, Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, China

4. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: Acupuncture therapy has been adopted in more than 183 countries and regions around the world. With the rapid development of robot technology, research and development of intelligent acupuncture robot become possible, based on its core technology related research, that the point of automatic positioning and intelligent distribution point is the key technology and difficulty in research and development of intelligent acupuncture robot was pointed out in this paper, and thus, the concept of communion robot potential application value to the development of medical robot was also discussed. The latest research results of intelligent acupoint matching were also provided.

Key words: medical robot, artificial intelligence, acupuncture treatment

1 引言

1985 年的机器人辅助定位神经外科活检手术标志着医疗机器人行业的起步^[1], 此后相继出现了手术机器人、康复医疗机器人和医院服务机器人等

各类医用机器人。当前国际医用机器人行业发展迅速, 市场巨大, 但我国相关产业仍处于起步阶段^[2], 且医院使用的产品以进口为主, 缺乏国内自主品牌。机器人行业缺乏实力雄厚的大公司, 研究力量分散^[3], 难以抗衡。针灸是中国在国际医疗领域有

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-06-21

通信作者: 卢东东, 381781382@qq.com

基金项目: 国家级大学生创新训练计划基金资助项目 (No.201610315011); 江苏省研究生实践创新计划基金资助项目 (No.SJCX17_0406)

Foundation Items: National Innovation Training Program for College Students (No.201610315011), Practical Innovation Program for Graduate Students in Jiangsu Province (No.SJCX17_0406)

发言权的优势行业，且被联合国教科文组织列为非物质文化遗产，在全球 183 个国家及地区应用，并被逐步纳入多个发达国家的医保体系。针刺研究标准化、国际化的重要性日益增加，智能针灸机器人的研发也成为一种趋势。本文对目前文献公开报道的针灸机器人及相关技术进行分析和讨论，从而为医疗机器人从业者提供一些帮助。

2 智能针灸机器人的研发进展

智能针灸机器人的研发可大致分为自动针刺、自动艾灸、智能诊断配穴等相关阶段，部分专利文献的描述虽然并未直接提及“针灸机器人”，但实际阐述了智能针灸机器人的相关功能，所以亦纳入讨论范围。

2.1 针刺机器人的研发进展

针刺机器人以针刺治疗为核心功能，而部分机器人或相关公司（以美国 AcuGraph 为代表）的设计还包含穴位诊断、经络诊断等功能，见表 1。

由表 1 可见，针刺机器人的核心技术——进针及手法模拟的技术已经相对成熟，各团队或机构的核心竞争点在于穴位诊断技术背后的算法及自动定位穴位，甚至辨证配穴的功能。而在目前的条件下，上述技术需要通过大规模采集数据进行人群队列分析，并经过临床验证才会相对客观而高效，故这也是针刺机

器人研发的主要难点。而在医疗硬件设施方面，以达芬奇手术机器人为代表的外科手术机器人，依靠极为成熟的机械控制和实时传感技术，已经在临床和商业中获得了广泛的认可，然而，力学反馈仍然是其中的难点，这在针刺机器人中亦是核心技术。力学反馈设备不仅是“针感”或“得气”效应最为直接的展示，更是人机协作的直接互动。针对这一问题，针刺机器人的解决方案或许是实现全自动的机械操作，即直接记录针具反馈的力学数据，然后使用算法分析，而非借助手套等设备反馈给机器人的操作者，进行实时的人工决断。而手术机器人最终或许亦会采用这一全自动反馈的方案，虽然要经历半自动的阶段，但完全自动化仍是医疗机器人的技术发展趋势。

2.2 艾灸机器人

艾灸是一种用艾灸材料熏烤体表穴位，激发经气活动，从而起到保健治病作用的疗法，找准刺激的穴位是灸法达到较好治疗的基础^[6]，而艾灸机器人多不具备穴位定位功能，因此亟待使用机器人技术实现部分自动化。传统艾灸需人工操作，存在诸多问题，如治疗时温度难以控制、艾火易掉落、艾草燃烧时有烟雾刺激等^[7]。针对这些问题，陆续有公司和个人进行发明和改进，目前国内已有多项与艾灸机器人相关的专利（见表 2）。

表 1 国内外针刺机器人及相关技术对比分析

	数字经络智能针灸机器人	针灸机器人 ^[4]	护理机器人 ^[5]
理论依据	1. 分形理论 2. 混沌理论 3. 图论 4. 数字经络理论 5. 传统中医理论	1. 仿生学原理 2. 功能分解及组合 3. 传统中医理论	1. 微位移驱动器 2. 柔性放大机构
治疗方法	针刺、艾灸、激光等可更换的治疗接口	针刺、自由度电动进针、电动捻转	手法运针
定位依据	1. 基于数字经络理论的矢量经络图 2. 基于双目视觉测量的自动定位	人工定位	柔性铰链微位移放大机构
人工智能	定量分析症候—穴位的关系，基于图论建立中医思维的人工智能模型	未提及	以 LabWindows/CVI 为编程语言，实现手臂复位控制等
机器手法	基本手法：提插，捻转； 补泻：提插补泻，捻转补泻； 快速无痛进针性能	基本手法：提插、捻转	握针、捻、转等刺激穴位的机械动作
芯片类型 / 控制技术	1. Arm32 2. JavaApplet 结合 CGI	1. 主—从操作机械手 2. 视觉监控系统	1. 压电陶瓷驱动器 2. 柔性放大机构
针刺精度	0.34 mm	未提及	行程：93×3 μm；位移分辨率：0.1 μm
进针速度	无痛进针速度：160 mm/s	提插最大进针速度：70 mm/s； 平均速度：2 mm/s	未提及
附加模块	AcuAI 智慧针灸系统	未提及	未提及

表 2	国内艾灸机器人相关专利情况	
	核心组件	产品结构
艾灸机器人 ^[8]	座体与数个机械臂，艾灸枪	以波珠定位自由关节连接
音乐艾灸机器人 ^[9]	灸盒、机械手臂、液压杆、万向节	机械手臂中间由万向节和液压杆连接；外设保护罩
艾灸机器人 ^[10]	艾灸盒、升降装置和艾烟处理装置	无线遥控器自动升降艾灸盒；有效过滤；密封好
智能艾灸机器人及其操作方法 ^[11]	控制机构排烟装置和艾灸装置	自动识别穴位；艾烟排放；检测和调控设备；距离传感器
智能化艾灸治疗装置 ^[12]	艾灸烘烤箱、智能升降旋转系统、清洁过滤系统	艾灸烘烤能升降和旋转；多根艾条同时燃烧

艾灸机器人的核心技术多集中在温度感应与控制方面，既要防止艾条离患者过近而灼伤皮肤，又要防止距离过远而降低刺激的温度，从而影响疗效。但目前市面产品多以家用为主，针对医院的具备高度自动化水平的艾灸机器人较少，需要进一步根据市场特点而进行针对性的研发工作。

2.3 与针灸相关的智能分析技术

生物电阻抗技术是一种利用生物组织与器官的电特性及其变化规律提取与人体生理、病理状况相关的生物医学信息的检测技术^[13]，已成为一种常用的诊断技术^[14]。目前较有代表性的产品 AcuGraph 利用皮肤电阻测定法可测得穴位处导电率高于周边皮肤，即电阻值低于周边皮肤，其被证实为一种有效的诊断工具。另外，输尿管结石、慢性骨盆疼痛、肥胖等^[15-16]均可表现出相关经络电导下降，故 AcuGraph 的临床应用广泛^[17]（见表 3）。这一无创的穴位测试与诊断技术为定量评估针灸疗效以及针灸标准化提供了较好的示范作用。

研究表明^[23-24]，一致性的差异可能由各种原因导致。测定时间、食物摄取、人体新陈代谢、循环交换，或纯粹的生物学物质差异（如角质层，汗管，电极极化、电极的几何安排）都可能使皮肤电阻测定值存在差异。

目前，许多商用穴位电阻测定仪均依托此技术

设计，如 Miridia Technology 的数字经络成像系统，Pitterling Electronic 生产的经络仪等。中国经络诊疗器在与疾病相关的穴位处找到变阻点或反应点后，用低频脉冲电流防治疾病^[25]，亦是此类产品的代表，其具有无创、安全的特性，易于推广，但由于技术壁垒不高、产品同质化现象较为严重，竞争力有限。

3 智能针灸机器人核心技术进展分析

3.1 穴位的自动定位技术

现将其中的穴位自动定位技术进行梳理，并与其他产品进行比较^[26]，具体见表 4。笔者所在团队于前期开展了“混沌内部的隐秩序——经络的数字化研究”^[27]的针灸科研项目，而国内同样有报道的穴位自动定位技术主要来自延自强团队。

3.2 安全进针技术

机器人从传统工业设计领域不断发展，扩展至医疗服务领域，但由于机器人机械结构与人体生理之间存在巨大差异，人机交互的柔顺性遇到巨大考验^[32]，安全性成为机器人技术中至关重要的问题。在进针技术方面，进针速度、精度及稳定度至关重要，当同时将针刺入人体时，身体柔软和结构复杂的软组织形变因素为安全进针技术带来了诸多考验。现有进针技术分析见表 5。

表 3	生物阻抗技术的临床应用实例	
应用领域	具体技术	说明
人体成分分析	总体水量测定 ^[18]	利用心搏量与阻抗值的最大变化率成比例的关系，通过阻抗的变化率换算心输出量
心脑血管系统疾病动态监测	无创监测心输出量 ^[19] ； 心脏骤停发生率测定 ^[20]	借助除颤仪及心阻抗图的频率、幅度改变，推断心脏功能
呼吸系统监测	区域性肺功能的检测及监护，如尘肺的早期诊断及治疗 ^[21]	基于肺内成分及其变化的电学特性测量肺阻抗等
乳腺癌检测	乳腺癌早期诊断 ^[22]	观察乳腺组织向肿瘤组织发展的变化情况

表 4 穴位自动定位技术对比

名称	数字经络智能针灸机器人 ^[28]	虚拟现实针灸穴位定位方法及系统 ^[29]	基于增强现实技术的智能针灸系统的视觉处理 ^[30]	仿射变换在增强现实智能针灸系统中的应用研究 ^[31]
技术核心	分形理论数字经络	虚拟现实技术	增强现实；立体视觉；双目视觉；立体匹配	增强现实；仿射变换
穴位定位方法	运用分形几何学构建数学公式	三维建模	运用 Barnard 算子来提取特征点	仿射坐标
硬件结构	基于进针速度与患者痛觉的定量关系开发出来的机械手	激光束发射探头、扳机式针灸针发射装置双选功能的机械臂	具有 6 个自由度的带激光探头的机械手	3D MAX 建模工具；具有 6 个自由度的带激光探头的机械手
优点	实现穴位图的矢量化	技术理论较完善，可实现自动化控制	建立了计算机虚拟世界与外界真实环境的桥梁	建立了计算机虚拟世界与外界真实环境的桥梁

表 5 现有进针技术分析

应用	核心技术或结构	安全策略	借鉴意义
自动针刺机械手 ^[33]	采用固定式结构，支架采用磁性机构，保证高度、转角、前后的三维方向调节，电机带动滚珠螺旋丝杆	控制并获取单片机反馈信息，人机交互，驱动电路实行应急处理	针刺过程及手法收集针刺参数，完善进针结构
机器人辅助经皮穿刺手术 ^[34]	建立穿刺力模型组织形变建模及针偏移建模，结合图像处理，进行力量、视觉反馈	先于病人旁进行启发式对针，快速粗对齐，后移至进针点附近，按可变控制继电器模块（variable relay control module, VRCM）进行微调	分析穿刺力数据，将进针过程划分为“被膜穿刺前”“摩擦力产生前”“力抖动”3个阶段
经皮脊柱手术 11-DOF 机器人	术前 CT 三维建模，摄像机与 LED 提供光学引导的位置导航，以磁定位系统强化位置跟踪	CT 术中用于实时引导的 11 个自由度中，8 个用于初部定位，3 个用于穿刺针推进器，便于穿刺机器人位置的固定紧锁与调整	完善术前建模，善用机械手自由度进行操控
目标靶点穿刺路径优化 ^[35]	D-H 法建立斜角柔软穿刺针正向运动学模型	利用合适的穿刺速度来提高穿刺稳定性，可实现较强的避障需求	穿刺针旋转角度误差补偿避障方案优化
自动进针路径规划 ^[36]	改进 Snake 模型对病灶进行凹凸性分析	通过对穿刺针的实时路径分析和引导，以最安全有效的路径规避障碍	规划进针最佳路径，进针过程中可根据位置、体位调整

多方机构在进针结构中逐步完善自身设计，并有一部分已投入临床使用。对比现有进针技术，回顾针灸机器人已有的完整稳定的进针结构，并通过机械臂实现操作。在后期发展过程中，可借鉴以上相关经验，实现实时针刺最优路径分析，分段、分点控制针刺操作，最大程度规避意外，建立针刺力模型，完成针刺组织形变、旋转角度等的误差补偿，实现人机交互科学性与柔软性的互通，确保在最大安全性的程度下完成诊疗。对于针灸机器人而言，此处的技术条件已经较为成熟，亟待进一步结合中医针灸的特点进行临床测试。

3.3 智能穴位配伍技术

前述的技术主要应用于针灸机器人的针刺治疗操作及诊断等，而本团队率先提出基于图论的智能针灸配穴系统^[37]，在构建腧穴—主治网络的基础上，通过穴—症的小世界网络，使临床取穴更加高效，以较少的穴位达到较好的疗效，提高针灸处方的性价比，为定量分析针灸学大数据提供科学方式，可用于建立智能机器人的思维模型，使机器人

理解经络并在得知症状后快速取穴，发展现代针灸^[38]。在新一代人工智能的发展过程中，需要有科学的哲学思考和简化的基本原理^[39]，在使用人工智能分析针灸穴位配伍时，可建立这一简化模型。使用智能化的针灸穴位配伍方式，需要首先建立相关的数学模型，基于此，本文采取了理论与临床实践结合的模式，即基于《针灸甲乙经》《针灸大成》《经络腧穴学》中的经穴及其主治病症信息建立穴位—主治病症网络，以符合腹泻型肠易激综合征诊断标准的患者为观察对象，测量其穴位敏化数据，以健康受试者穴位敏化值为对照，采集入组人员的基本信息与疾病相关信息。分析腹泻型肠易激综合征患者原穴电敏化的发生规律，引入建模得到的拓扑指标进行原穴的拓扑参数加权平均数计算。发现穴—症网络中原穴节点的紧密中心度、特征向量中心度指标具备穴位特异性；基于中介中心度或特征向量中心度的加权平均数算法，腹泻型肠易激综合征患者的原穴电阻拓扑参数加权平均数均高于健康受试者， p 值分别为 0.032 和 0.046。说明基于原穴特征向量中心度等的加权平

均数算法更能体现患者与健康人穴位的整体差异性。基于图论研究、表述穴位敏化的规律是一个可行的尝试, 其为智能配穴模型的建立提供了一种可行的思路。

4 结束语

智能针灸机器人的研发体现了机械、医学、计算机等多学科的交叉融合, 是中医现代化的尝试性工作之一, 而其研发的细节体现出了定量化、标准化的“医工结合”的开发趋势, 也为新医科、新工科相关工作的开展提供了参考。

参考文献:

- [1] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 45-52.
NI Z Q, WANG T M, LIU D. Overview of medical robot technology development[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 45-52.
- [2] 张送根, 王豫. 基于数据分析概述医疗机器人产业发展现状及未来趋势[J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(7): 14-18.
ZHANG S G, WANG Y. Overview of the development status and future trend of medical robotics industry based on data analysis[J]. China Medical Devices Information, 2017, 23(7): 14-18.
- [3] 王友发, 周献中. 基于专利地图的机器人产业知识产权发展对策[J]. 中国科技论坛, 2015(9): 31-37.
WANG Y F, ZHOU X Z. Development strategy of intellectual property rights of robot industry based on patent map[J]. China Science and Technology Forum, 2015 (9): 31-37.
- [4] 王雨, 赵臣. 一种新型针灸机器人[J]. 机器人技术与应用, 2007, 4: 37-39.
WANG Y, ZHAO C. A new acupuncture robot[J]. Robot Technology and Applications, 2007, 4:37-39.
- [5] 袁淑娟. 智能材料驱动的护理机器人控制系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
YUAN S J. Research on the control system of nursing robot driven by intelligent materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [6] 熊俊, 耿乐乐, 迟振海, 等. 艾灸治疗不同灸感腰椎间盘突出症急性期患者 60 例疗效观察[J]. 中医杂志, 2015, 56(21): 1836-1839.
XIONG J, GENG L L, CHI Z H, et al. Observation of curative effect of moxibustion on 60 patients with acute stage of lumbar disc herniation with different moxibustion sensations[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2015, 56 (21): 1836-1839.
- [7] 潘礼庆, 沈晓冬. 机器人技术在中医领域中的应用[J]. 机器人技术与应用, 2010(1): 28-30.
PAN L Q, SHEN X D. Application of robot technology in traditional Chinese medicine[J]. Robot Technology and Application, 2010(1): 28-30.
- [8] 韩志伟. 艾灸机器人[P]. 2012.
HAN Z W. Moxibustion robot[P]. 2012.
- [9] 樊红杰. 音乐艾灸机器人[P]. 2015.
FAN H J. Music moxibustion robot[P]. 2015.
- [10] 陈爱明. 一种艾灸机器人[P]. 2017.
CHEN A M. A moxibustion robot[P]. 2017.
- [11] 周顺利, 肖曦. 一种智能艾灸机器人及其操作方法[P]. 2017.
ZHOU S L, XIAO X. An intelligent moxibustion robot and its operating method[P]. 2017.
- [12] 张季冬. 一种智能化艾灸治疗装置[P]. 2017.
ZHANG J D. An intelligent moxibustion treatment device[P]. 2017.
- [13] 王文艇, 钟季康, 马骏, 等. 生物阻抗技术概述[J]. 上海生物医学工程杂志, 2005, 26(2): 119-123.
WANG W T, ZHONG J K, MA J, et al. Overview of bioimpedance technology[J]. Shanghai Journal of Biomedical Engineering, 2005, 26(2): 119-123.
- [14] SHARMA B, HANKEY A, NAGENDRA H R, et al. Inter-operator variability of electrodermal measure at Jing-Well points using AcuGraph 3[J]. Journal of Acupuncture and Meridian Studies, 2014, 7(1).
- [15] AHN A C, SCHNYER R, CONBOY L, et al. Electro-dermal measures of Jing-Well points and their clinical relevance in endometriosis-related chronic pelvic pain[J]. Altern Complement Med. 2009, 15: 1293e1305.
- [16] AHN A C, MARTINSEN O G. Electrical characterization of acupuncture points: technical issues and challenges[J]. Altern Complement Med, 2007, 13: 817e824.
- [17] 王倩, 许欢, 周广敏, 等. 生物阻抗测量技术及其临床应用研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2014, 33(2): 185-190.
WANG Q, XU H, ZHOU G M, et al. Progress in bioimpedance measurement technology and its clinical application[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2014, 33(2): 185-190.
- [18] CAROLINA H Y L, ANTON J M C, PICTERNELLA E S, et al. Accuracy of direct segmental multi-frequency bioimpedance analysis in the assessment of total body and segmental body composition in middle aged adult population[J]. Clinical Nutrition, 2011, 30(5): 610-615.
- [19] KEREN H. Evaluation of a noninvasive continuous cardiac output monitoring system based on thoracic bioimpedance[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2007, 293: H583-589.
- [20] NAVARRO C O, CROMIE N A, TURNER C, et al. Detection of cardiac arrest using a simplified frequency analysis of the impedance cardiogram recorded from defibrillator pads[J]. Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011: 1709-1712.
- [21] ANJA W-K, KROKER A, MURIEL G, et al. A practical guide to bioelectrical impedance analysis using the example of chronic obstructive pulmonary disease[J]. Nutrition Journal, 2011, 10(1): 35.
- [22] WANG W, TANG M, YANG J, et al. Electrical impedance mammography: a new imaging modality for breast cancer screening[C]// Proceedings of the 9th Annual Conference of LSSCB. 2000.
- [23] LIN W C, CHEN Y H, XU J M, et al. Application of skin electrical conductance of acupuncture meridians for ureteral calculus: a case report[J]. Case Rep Nephrol, 2011, 4.
- [24] SANCER K M. The effect of qigong on therapeutic balancing measured by electro acupuncture according to Voll (EAV): a preliminary study[J]. Acupunct Electrother Res. 1994, 19: 119e127.
- [25] 张光辉. 中国经络诊疗器的临床应用[J]. 中国针灸, 1994(S1): 400-401.
ZHANG G H. Clinical application of Chinese meridian diagnostic and therapeutic apparatus[J]. Chinese Acupuncture and Moxibustion, 1994 (S1): 400-401.
- [26] 吴思琪, 徐天成. 数字经络理论与自动取穴技术[J]. 中医药导报, 2016, 22(14): 27-31.
WU S Q, XU T C. Digital meridian theory and automatic acupoint selection technology[J]. Introduction to Chinese Medicine, 2016, 22(14): 27-31.

- [27] 徐天成. 混沌内部的隐秩序——经脉内涵的另一种解读[J]. 中国针灸, 2015, 35(2): 151-154.
XU T C. Implicit order in chaos: another interpretation of the connotation of meridians[J]. Chinese Acupuncture and Moxibustion, 2015, 35(2): 151-154.
- [28] 卢东东, 徐天成, 贾卜宇. 机械手以及机械手控制方法[P]. 2016.
LU D D, XU T C, JIA B Y. Manipulator and inventor of manipulator control method[P]. 2016.
- [29] 延自强, 曾芬芳. 虚拟现实针灸穴位定位方法及系统[P]. 2002.
YAN Z Q, ZENG F F. Virtual reality acupoint location method and system inventor[P]. 2002.
- [30] 滕玮, 田淮, 曾芬芳, 等. 基于增强现实技术的智能针灸系统的视觉处理[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2004, 1: 46-50.
TENG W, TIAN H, ZENG F F, et al. Visual processing of intelligent acupuncture and moxibustion system based on augmented reality technology[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition), 2004, 1: 46-50.
- [31] 滕玮, 曾芬芳. 仿射变换在增强现实智能针灸系统中的应用研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2006, 20(4): 55-59.
TENG W, ZENG F F. Application of affine transform in augmented reality intelligent acupuncture and moxibustion system[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 20(4): 55-59.
- [32] 杨晓媛, 杨迎迎, 顾继昱, 等. 进针速度与患者痛觉的潜在关系[J]. 中医杂志, 2016, 57(23): 2004-2007.
YANG X Y, YANG Y Y, GU J Y, et al. Potential relationship between needle insertion speed and patient pain[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2016, 57(23): 2004-2007.
- [33] 章浩伟, 朱训生, 王震虹, 等. 自动针刺机械手的研制及其在失血性休克中的应用分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2008(4): 801-804, 841.
ZHANG H W, ZHU X S, WANG Z H, et al. Development of automatic needling manipulator and its application in hemorrhagic shock[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2008 (4): 801-804, 841.
- [34] 胡旺宁. 经皮穿刺手术软组织穿刺力建模与机器人应用软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
HU W N. Soft tissue puncture force modeling and robot application software design for percutaneous puncture surgery[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2009.
- [35] 李强. 机器人辅助针刺稳定性分析及路径规划[D]. 西宁: 青海大学, 2016.
LI Q. Robot-assisted needle puncture stability analysis and path planning[D]. Xining: Qinghai University, 2016.
- [36] 刘文轩. 基于视频图像识别的自动穿刺进针机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
LIU W X. Study on the mechanism of automatic puncture and needling based on video image recognition[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010.
- [37] 徐天成, 李诗园, 徐先红, 等. 基于穴—症关系的经脉拓扑模型定量研究[J]. 中国针灸, 2017, 37(11): 1229-1232.
XU T C, LI S Y, XU X H, et al. Quantitative study of meridian topological model based on acupoint-syndrome relationship[J]. Chinese Acupuncture and Moxibustion, 2017, 37 (11): 1229-1232.
- [38] 刘震, 赵壮, 林祺, 等. 基于图论的智能针灸机器人取穴原理研究[J]. 世界中医药, 2018, 13(8): 1992-1996.
LIU Z, ZHAO Z, LIN Q, et al. Research on acupoint selection theory of intelligent acupuncture robot based on graph theory[J]. World Tra-

ditional Chinese Medicine, 2018, 13 (8): 1992-1996.

- [39] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 1-3.
ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 1-3.

[作者简介]



徐天成(1993—), 男, 江苏南京人, 南京中医药大学博士生, NBH 国际青年创意奖首位中国得主, 联合国教科文组织 IYF3 中方代表, 主要研究方向为医疗机器人、图论、针灸效应机制等。



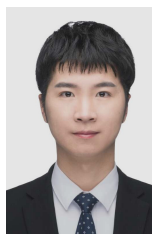
王雪军(1993—), 女, 天津人, 南京理工大学硕士生, 主要研究方向为智能硬件研发。



卢东东(1991—), 男, 新疆石河子人, 中国科学院空天信息研究院助理研究员, 主要研究方向为智能硬件研发。



卢梦叶(1995—), 女, 江苏溧阳人, 南京中医药大学硕士生, 主要研究方向为针灸现代化。



林祺(1994—), 男, 江苏常州人, 南京中医药大学硕士生, 主要研究方向为针灸现代化。

张小强(1992—), 男, 陕西岐山人, 南京理工大学硕士生, 主要研究方向为智能硬件研发。

成艺(1997—), 女, 四川遂宁人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为网络安全。