

平行医疗机器人

白天翔 王双翌 刘雅婷 李汉忠 闻艺

Parallel surgical robots

BAI Tianxiang, WANG Shuangyi, LIU Yating, LI Hanzhong, WEN Yi

引用本文:

白天翔, 王双翌, 刘雅婷, 等. 平行医疗机器人[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 222-233.

Tianxiang BAI, Shuangyi WANG, Yating LIU, et al. Parallel surgical robots[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 222-233.

您可能感兴趣的其他文章

平行模糊控制: 虚实互动、相互增强的自学习控制方法

Parallel fuzzy control: a self-learning control method with virtual-real interaction and mutual enhancement

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 267-273

平行轮胎的基本架构与关键技术

Basic framework and key technologies of parallel tires

智能科学与技术学报. 2022. 4(3): 445-457

基于平行控制的离散非线性系统的事件触发近似最优控制

Parallel control-based event-driven approximate optimal control of discrete-time nonlinear systems

智能科学与技术学报. 2021. 3(4): 435-443

平行控制与数字孪生: 经典控制理论的回顾与重铸

Parallel control and digital twins: control theory revisited and reshaped

智能科学与技术学报. 2020. 2(3): 293-300

强化学习: 迈向知行合一的智能机制与算法

Reinforcement learning: toward action-knowledge merged intelligent mechanisms and algorithms

智能科学与技术学报. 2020. 2(2): 101-106

平行艺术: 人机协作的艺术创作

Parallel art: artistic creation under human-machine collaboration

智能科学与技术学报. 2019. 1(4): 335-341

平行医疗机器人

白天翔^{1,2}, 王双翌¹, 刘雅婷^{1,2}, 李汉忠³, 闻艺^{4,5,6}

- (1. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190;
2. 航天科工集团智能科技研究院有限公司, 北京 100043;
3. 北京协和医院, 北京 100730;
4. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006;
5. 北京怀柔平行传感智能研究院, 北京 101400;
6. 中国科学院自动化研究所北京市智能化技术与系统工程技术创新中心, 北京 100190)

摘要: 医疗机器人对于提高医疗效率, 减轻患者痛苦, 具有重要的社会意义和科研价值。针对医疗机器人的难点, 提出了基于ACP平行系统方法的平行医疗机器人概念。平行医疗机器人主要由物理医疗机器人和虚拟医疗机器人组成, 通过并联医疗机器人可以实现对整个系统进行管理和控制, 对治疗过程进行实验和评估, 对医生和患者进行学习和培训。介绍了支撑平行医疗机器人的相关技术, 包括机器人仿真、生物力学、3D打印和知识自动化技术等, 并结合平行学习提出平行医疗机器人所应具备的描述、预测和处方三大核心功能。最后, 以机器人经食管超声系统展示了平行医疗机器人的典型应用。

关键词: 平行机器人; 医疗机器人; 平行学习; 平行控制

中图分类号: TP29

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202319

Parallel surgical robots

BAI Tianxiang^{1,2}, WANG Shuangyi¹, LIU Yating^{1,2}, LI Hanzhong³, WEN Yi^{4,5,6}

1. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Intelligent Science & Technology Academy of CASIC, Beijing 100043, China
3. Peking Union Medical College Hospital, Beijing 100730, China
4. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China
5. Beijing Huairou Academy of Parallel Sensing, Beijing 101400, China
6. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Medical robots improve medical efficiency and reduce patients' suffering that owns social significance and scientific research value. Focusing on the difficulties of medical robots, we propose the concept of parallel medical robotics based on the ACP (artificial societies, computational experiments, parallel execution)-based parallel system method. parallel medical robot is mainly composed of a physical medical robot and its virtual counterpart, through which we can realize the management and control for the overall system, conduct experiments and evaluation for the treatment process, and learning and training for doctors and patients. Parallel medical robotics is supported by robot simulation, biomechanism, 3D printing and knowledge automation techniques, and holds three core functions that are description, prediction and prescription when combined with parallel learning. We demonstrate the framework and its potential usages with a robotic trans-esophageal ultrasound system.

Key words: parallel robotics, surgical robot, parallel learning, parallel control

收稿日期: 2023-02-05; 修回日期: 2023-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.61533019)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61533019)

0 引言

进入21世纪以来,随着健康医疗、精准医疗和个性化医疗的推广,医疗机器人的应用价值与社会意义逐渐被发掘。医疗机器人具备高效性、稳定性、精准性,在目前的医疗服务中可以与医生紧密合作,辅助医生完成诊断、手术、康复工作。面对人力资源紧张和医疗劳动力成本高昂的医疗环境,人们对机器人辅助医疗的需求迅速增长。

20世纪90年代,医疗机器人伊索问世,其作为遥控腹腔镜为医生提供精确、稳定的视野。1996年,直觉外科(Intuitive Surgical)公司推出第一代达芬奇手术机器人,并很快成为全球应用最广的手术机器人,广泛适用于心血管外科、妇科、胸外科、泌尿科、普外科等重要科室。仅2017年,各型达芬奇机器人在全球范围内总共参与了超过75万例手术^[1]。但随着专利保护期将至,其他厂商也在崛起并不断取得美国食品药品监督管理局(FDA)认证和欧洲CE认证,开始抢占微创手术机器人市场,如美国Transenterix公司的Senhance手术机器人^[2]、英国CMR Surgical公司的Versius手术机器人、韩国Meere公司的Revo-I手术机器人等(如图1所示)。尽管一些企业成功坚持下来,但大多数医疗机器人项目因为产品定位或医疗许可证问题被废弃。2008年,我国医院首次引进达芬奇手术机器人,这是我国使用的第一台医疗机器人。随后,我国推出一系列政策鼓励医疗机器人发展。2016年,国内自主设计的微创脊柱外科手术机器人获得国家食品药品监督管理总局(CFDA)销售许可。目

前,我国已有超过40家企业涉足医疗机器人领域,全国医疗机器人市场在2019年达到43.2亿元人民币,预计在2025年突破百亿^[3]。

近10年,医疗机器人在灵活性、准确度、成像清晰度等方面快速提高,通过视觉、触觉、VR、AR技术提升与医生的交互体验,并逐渐开始具备一定的认知推理和学习能力。尽管医疗机器人在变革中取得突破,但医疗机器人的应用仍面临一定阻碍,主要是医疗机器人的安全性与可靠性问题。例如,达芬奇机器人^[4]2013年就由于使用不当造成了医源性伤害,2014年更是收到超过百起相关诉讼。由于与人类密切接触,一些错误操作或者功能性异常会对人体造成直接伤害。文献[5]将机器人的可靠性归结为几点:一是故障防治,即通过良好的系统设计和系统工程方法使机器人不出现错误;二是故障排除,即用检验和验证技术减少故障数量,减轻严重程度;三是故障预测,即用风险分析方法估计未来的意外状况和可能导致的故障结果;四是故障容许,即添加系统裕量,确保出现故障时系统不会崩溃,从而引发更大损失。显然,保证机器人的安全性和可靠性不仅依赖良好的系统设计,还需要大量实验进行检验与验证。

对医疗机器人的实验是制约其发展的重要因素。使用动物或器官标本实验是一种主要方法,但不仅经济成本高,而且与真实环境差异较大,往往局限于功能验证,即验证机器人能否完成指定动作。而在医疗机器人真正取得许可并进入市场之前,必须经过临床人体实验,而这存在巨大的法律和伦理风险^[6]。为解决这一问题,结合平行系统理论^[7],笔者从平行机器人^[8-10]的概念引出平行医疗机器人,以虚实互动的方式实现对医疗机器人系统的管理与控制、对医疗过程的实验与评估、对医务人员的管理与培训。

1 医疗机器人概述

医疗机器人是一个广义的概念,包括服务于医患交互各个环节的多种机器人,依赖医学、工程学和工业界之间的跨学科合作,其中涉及医学、机器人学、材料学、生物力学、计算机视觉等关键技术。医疗机器人按照所执行任务的不同,主要分为诊断机器人、手术机器人、康复机器人。

1.1 诊断机器人

诊断机器人是辅助医生进行病理采样、化验、

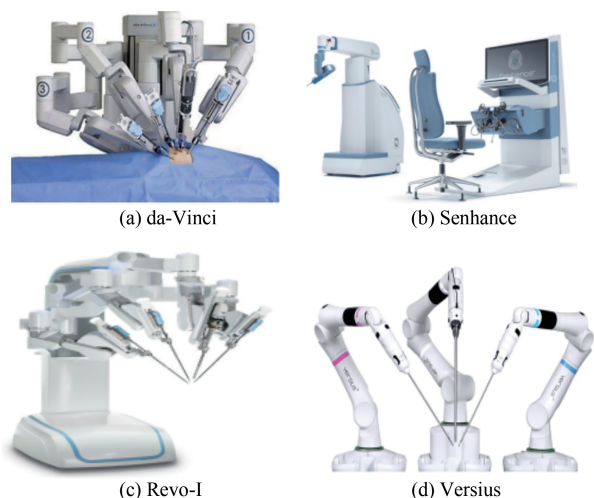


图1 典型的医疗机器人

诊断的机器人。诊断机器人依赖医学影像、血液检测技术、活体组织检查技术,对病例进行病理学检查,检查结果作为临床诊断的重要组成部分。针对不同病例,诊断机器人主要包括介入超声机器人、体外超声机器人、微创诊断机器人等。

1.2 手术机器人

手术机器人包括微创手术(minimally invasive surgery, MIS)机器人、经自然腔道内镜手术机器人(R-NOTES)。

1.2.1 微创手术机器人

微创手术机器人一般包含控制台、手术机器人和摄像系统3个部分。控制台包括视频监控、控制柄、脚踏板,允许医生通过手柄、踏板和语音控制输入。摄像系统可以实现3D-HD成像,一般包括超声成像(HSG)或基于吲哚菁素的红外成像(IR ICG),具备局部放大10~15倍的能力。机械臂一般具备7个自由度以上,腕部关节活动度大,可以达到与人手相当的灵活度和准确度,同时消除颤动。在其末端配备手术刀、超声手术刀、缝合器等手术仪器,以执行抓持、钳夹、缝合等手术操作^[11]。

微创手术机器人采用主从方式,由医生使用控制台操作机械臂系统,外科医生在消毒区域外作业。其运动机构采用远心点设计方式,以实现手术中微器械绕创口的远心点运动,轨迹规划在笛卡尔空间完成,从而实现主从跟随性。微创手术机器人的核心性能指标包括准确性、可靠性和安全性。自1997年第一起腹腔镜手术开始,微创手术机器人逐渐被应用于普通外科、泌尿外科、心脏外科、妇科等临床手术中。

目前,微创手术的发展集中在触觉反馈^[12-14]、紧凑化^[15-17]和纳米机器人^[18-20]方向。触觉反馈一般被描述为对力/运动反馈和触觉/皮肤反馈的结合,对于分析组织特征信息、检视手术结果有重要作用,缺乏力反馈能力的微创手术机器人可能导致手术中施加过度或不足的力^[21]。纳米机器人指那些由1~100 nm的元器件组成的,最终大小不超过1 mm的机器人,其可以进行细胞层面的操作,这将很大程度上提升准确性和手术效率,降低对组织器官的伤害。另一种改进微创手术机器人的主要方向是单孔腹腔镜手术机器人(R-LESS),即通过减少手术切口数目减少患者恢复时间、减轻术后疼痛、降低生疮风险、美化创口。R-LESS面临的主

要问题包括人体工程学不好、三角结构缺失、仪器碰撞、有限的组织收缩等^[21]。

1.2.2 经自然腔道内镜手术机器人

经自然腔道内镜手术(NOTES)机器人也使用腹腔镜仪器设备进入患者体内,使得医生可以观察并操作患病组织。相对于MIS机器人,NOTES机器人使用更灵活的多自由度机器人,经过人体自然腔道(如食道、肠道等)进入人体内,从而进一步减轻组织伤害,减少康复时间。NOTES最大的优势在于不需要从腹部切口,因而不会造成相关的腹壁的并发症^[22],使手术结果更美观,在减少麻药使用的同时能够减轻病患的痛苦。

第一台NOTES机器人起源于2004年^[23],而第一起作用于人体的手术案例则在2006年^[24],随后出现了越来越多的NOTES应用案例。然而NOTES机器人仍面临一些挑战,比如:针尖运动和组织变形较大带来的误差;视角和通道平行导致丧失三角性;缝合过程中的反作用力影响灵活末端的刚性;定位和导航能力不足^[22]。

NOTES机器人的发展趋势集中在提升灵巧性、三角性和平台的稳定性。其中,三角性是NOTES面临的突出问题,一种有效的方法是分离机械臂和摄像部。当无法分离时,机械臂提供的高精度和大三角性则是有效途径,通常采用线驱动结合视觉反馈^[25]的方式。线驱动对于实现高自由的操作很有帮助,局限性在于操作延时^[26-27]。另一种方式是采用磁微型机器人^[28],通过磁控方式进行定位和移动,其局限性在于磁力、机械结构和无线控制都存在不稳定的现象。NOTES机器人的灵活性造成平台存在一定的不稳定性,这一问题可以通过在到达指定位置后切换到刚性模式并锁定形变,从而抵抗外部组织器官施加的力来解决。这种锁定一般通过线张力和气动机构实现^[29-30]。此外,也有团队使用蛇形机器人结构或铰接式结构,以增强NOTES机器人的稳定性^[31-32]。

总之,NOTES机器人的未来发展方向包括:有足够的刚性和柔性的智能化材料;使用视觉伺服以提升运动的准确性;运用VR/AR技术提供更好的导航交互;在末端加入压力、力矩传感器和触觉传感器以丰富传感信息^[22]。

1.3 康复机器人

随着人口老龄化程度逐渐加深,社会对医疗护理和康复的需求逐渐增加。一方面,我国的康复医

疗资源相对缺乏, 从业人员数量难以弥补即将到来的巨大空缺; 另一方面, 传统的康复治疗方法体力消耗大、工作周期长, 进一步加剧了医疗资源短缺的问题。

康复机器人主要面向中枢神经系统损伤后的感知和运动功能障碍的患者, 包括中风^[33]或脊髓损伤 (SCI)^[34], 其根本在于对神经可塑性的利用, 重点在于对患者的运动康复^[35]。

康复机器人需要考虑先进交互方案, 并集成传感器监控患者的实际状态, 从而实现精确化、自动化、智能化的康复训练。康复机器人技术涉及机械结构设计、人机交互、主动训练、柔顺设计、处方设计、康复评价等。其中, 机械结构与患者康复需求密切相关, 对不同部位的康复训练需要考虑平衡、灵活度和力量, 在机械结构的复杂性和活动上体现出差异。康复训练方法体现在不仅对不同患肢 (如上肢或下肢) 的康复需求有差异, 而且针对不同病因的治疗方案也有很大差异, 治疗的强度和剂量也有显著差别。康复机器人应始终提供有针对性的身体支持, 适应病人的功能能力, 使功能正常运转, 因此与患者的交互至关重要。目前, 已有研究通过肌电^[36]、脑电^[37]或力传感^[38-39]等方法识别患者运动意图, 其难点在于识别的准确性和鲁棒性。文献[40]对康复机器人的发展方向进行了详细综述。

2 平行系统与 ACP 方法

医疗机器人涉及从机器人和机器人视觉领域到医学领域的诸多技术。随着技术进步, 医疗机器人的执行精度、刚度和传感器性能得到显著提升, 同时其尺寸也在进一步减小。深度学习在机器视觉领域的应用, 为医疗机器人提供了智能分析的可能。多种人机交互技术使得医生和病患可以更全面地表述自己的需求。经过 20 余年的临床实践, 医学界在医疗机器人方面积累了丰富的经验。这一切都在推动医疗机器人向使用更广泛、医疗任务更具挑战性的方向发展。在新的挑战中, 机器人的动作和策略空间更加复杂, 由医生和病患带来的不确定性更加突出。这些复杂性是困扰医疗机器人进一步发展与应用的主要原因。

综上, 医疗机器人是一个复杂系统, 其复杂性一方面来源于其本身复杂的机械结构和传感器, 另一方面来源于医疗过程的复杂性。解决复杂系统问

题需要从复杂性科学的角度进行思考。所谓复杂性科学是运用非还原论方法研究复杂系统产生复杂性的机理及其演化规律的科学, 其基本原理包括整体性、动态性、宏观与微观相统一、确定性与随机性相统一^[7]。

复杂系统是由“不可分”假设和“不可知”假设界定的, 在资源有限的前提下, 前者表明一个复杂系统的整个行为不可能通过对其部分行为的单独分析而完全确定, 后者表明一个复杂系统的整体行为不可能预先在大范围内完全确定。因而对复杂系统的研究往往不满足科学上“可实验”“可重复实验结果”这两个要求。例如心脏外科手术, 一是对患者心脏进行机器人手术实验面临巨大的法律和伦理风险, 二是无法对同一患者进行大量重复性实验, 三是难以寻找在生理和病理上非常相近的病例进行重复实验。除了实验难题, 复杂系统也难以建立足够精确的预测模型。例如文献[41]中的上肢康复机器人可以包含 20 个自由度, 运动方式包括手指、手、肘、肩膀的关节屈伸、外展和旋转动作, 在此基础上需要与人体上肢复杂运动具备较好的相合性, 因此, 在建模机器人和传感器、患肢、病患行为, 以及病患神经重塑过程中会引入大量误差。特别是病患神经重塑过程, 很难建立足够精确的模型以预测病患行为对重塑过程的影响。

复杂问题可以被离线、经验性、粗粒度分析, 文献[42]将此定义为问题的不确定性 (uncertainty)、多样性 (diversity)、复杂性 (complexity), 简称 UDC 问题。王飞跃提出的基于 ACP 的平行系统方法^[43]将此类问题转化为敏捷、聚焦和收敛 (agile, focus and convergence, AFC) 的问题, 从而解决复杂系统管理与控制问题^[44]。

图2所示为平行系统的基本框架。平行系统由实际系统和与之对应的一个或多个个人工系统构成, 通过二者虚实互动的相互作用, 实现对系统的管理与控制、对方案的实验与评估、对人员的管理与培训。

具体而言, 平行系统通过建立与实际系统相对应的人工系统, 实现求解空间的突破, 即在原来的实际空间上叠加虚拟空间。平行系统中二者既相互联系, 又可独立运行, 各自具有状态观测和控制能力^[45]。人工系统的状态可以通过实时和历史数据计算推演得到, 通过将其与实际系统对比, 实现对未来状态的预测和评估, 并基于此调整系统的管理

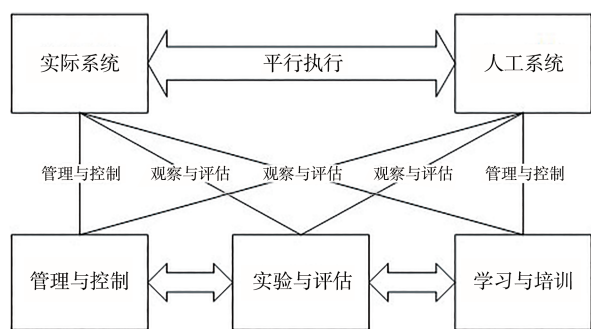


图2 平行系统基本框架

与控制方式，从而获得有效的策略，实现对人员的管理与培训。

2004年，王飞跃提出ACP方法，并将其作为平行系统解决复杂系统问题的指导思路。ACP即人工社会（artificial societies）、计算实验（computational experiments）、平行执行（parallel execution）三者的有机组合^[46]。ACP方法描述了实现平行系统的3个步骤：建立人与实际系统相对应的人工系统；在人工系统利用计算实验进行分析和评估；通过人工系统与实际系统的平行执行实现管理与控制。

人工系统可以理解为将传统数学解析建模方法扩展到广义的知识模型，其不仅应当与实际系统具有一致性，还应当便于计算和大规模部署。计算实验是在人工系统中通过计算推演得到复杂系统特性的手段，是传统仿真模拟的升华。计算实验由数据驱动，需满足可计算、可优化、实时性等要求，融合知识自动化和机器学习方法，从小数据提取知识，再结合计算实验生成大数据。平行执行是自适应控制思想的推广，构成在虚实空间中的大闭环反馈，从而保证优化和执行结果的收敛。

目前，基于ACP方法的平行系统应用于企业管理^[47]、智能交通^[48-49]、计算机视觉^[50]、控制理论^[51]、机器学习领域^[52]，以解决领域中的复杂问题。

3 传统医疗机器人研发框架

如图3所示，以手术机器人为例，首先需根据患病类型、患病部位和治疗方法指定医疗机器人所需搭载的手术仪器，如外科缝合器、手术钻、手术刀等；依据医生需求指定医疗机器人所需搭载的传感设备，包括腹腔镜、超声设备等；再次，根据医生的操作习惯和手术所需的工作空间和灵活度，设计机器人的工作空间和自由度，并确定机器人的机

械结构；然后，根据所需的柔性和刚性设计机器人的驱动器、减速器和制动器，并依照安全性设计安全保护机构；最后，根据医生的需求为机器人定制图像显示设备和遥控设备。

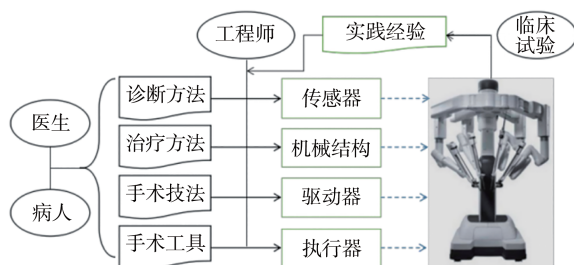


图3 手术机器人研发流程示意图

其中，传统医疗机器人的研发核心在于定制机器人的机械模型，使其可以模拟医生在手术过程中的运动方式。这一过程非常依赖机器人工程师的经验，也就是对医疗机器人的经验知识模型。通过对大量医生病人的需求进行分析，了解经验模型所需的输入信号和输出结果，在CAD中建模机器人基础模型。根据所需的刚性、柔性和故障保护机制设计所需的执行器和控制器。

然而，在获得可行的机械模型后，医疗机器人更重要的一步在于实验。通常，除了通过CAD/Matlab仿真验证模型的运动空间和控制功能以外，还需要制作真实的机器人样品，并在一系列离线实验、动物实验、模拟组织器官实验以后，方可申请临床实验。通过实验总结经验，迭代修改机械模型，然后再进行实验。在这个研发过程中，不仅涉及机器人工程师，还在各个环节涉及医生、志愿者和实验动物，需要多次机械设计、原型实现、实验准备，因而开发成本高，周期长。

此外，医疗机器人的可靠性一直是行业内最被关注的问题，出于伦理道德和法律要求，医疗机器人必须是足够安全的。为了评估机器人的安全性，大多数标注都采用基于风险概念的通用方法，这便引出了机器人的风险管理问题。虽然针对机器人的安全标准目前难有定论^[5]，但对于医疗机器人，应当以最严格的标准进行规范。

毫无疑问，机器人的可靠性验证需要从设计裕量、实验验证、风险防范3个方面进行考量。特别是实验验证既需要静态检验，即通过理论分析和规则约束确保系统不会发生错误；也需要动态验证，即通过设计案例检验是否会触发并展现错误；还需

要通过风险分析方法评估危险发生的可能性和系统的不确定性。

此外,在完成原型机后,还需要对医生或患者进行长时间培训,使医生或患者熟悉并了解医疗机器人的使用方法和性能,这样医生和病患才能将实际体会反馈给机器人开发人员以供改进方案。医患虽然被纳入开发流程,但却很难进入开发流程的设计阶段,这一方面会增大设计原型的成本消耗,另一方面也会导致一些需求由于修改成本高而最终没有被满足。这也是许多医疗机器人项目折戟的原因^[1]。

4 平行医疗机器人研发框架

平行医疗机器人的概念源于平行机器人,是王飞跃于2015年将平行系统理论扩展到机器人领域提出的概念^[10]。平行机器人的核心是软件定义的虚拟机器人 (software-defined robot, SDR), 在人工系统中运行,并作为实际物理机器人的虚拟代理,负责物理机器人的学习、评估、协调、管理和人机交互工作。一般而言,平行机器人是包括物理机器人、软件定义的机器人、虚拟环境、Ad-Hoc网络、知识库和人工智能技术的结合^[9]。

软件定义的概念源于软件定义的网络 (SDN), 后者通过将网络的控制与转发分离,结合开放的编程接口,可以实现网络的灵活控制。换言之,SDN通过将网络控制和硬件层分离,形成双层结构,从而解耦网络的硬件与控制,将控制逻辑封装并集中控制,从而提升网络的灵活性、可优化性、可维护性和可移植性。借鉴该思路,SDR对机器人的硬件平台和控制层解耦,并从知识和行为的角度进行分离,保留具有实际执行能力的部分——物理机器人,负责处理机械自动化任务;而知识处理部分——软件定义的机器人或软件机器人,负责处理知识自动化任务。二者并举形成平行机器人。

平行机器人的架构不仅需要物理意义上的机器人和软件意义上的机器人集成在一起,还将其他动态参与者整合到系统中,如机器人的操作对象,或是机器人的操作员,也就意味着将人类纳入系统中。平行机器人基本框架如图4所示。与传统机器人的系统框架相比,平行机器人框架增加了一个虚拟控制、虚拟执行和虚拟感知的扩展循环。其中基本循环和扩展循环之间的流动是数据和知识。流程从真实数据开始,用虚拟数据增加,并衍生到知识

中,从而产生新的知识和循环周期^[9]。通过平行互动,平行医疗机器人实现了对机器人的管理与控制、对治疗过程的实验与评估、对医患的学习与培训。

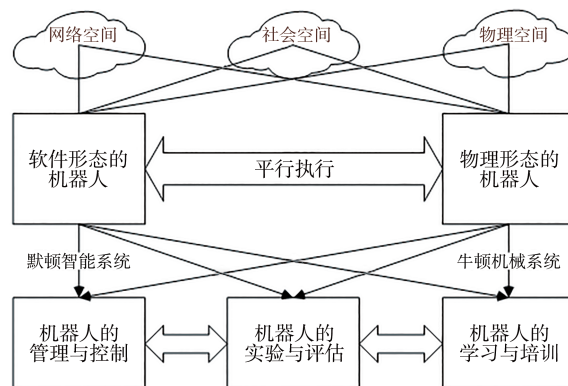


图4 平行机器人基本框架

4.1 平行医疗机器人系统框架

平行医疗机器人是平行机器人框架在医疗机器人领域的体现。平行医疗机器人由物理系统、人工系统和医患系统构成,其中物理系统包括各型医疗机器人、医疗机器人所携带的传感设备和手术器械、医疗机器人的服务对象;人工系统是通过虚拟仿真或者实体仿真构建的,与物理系统相对应,既包含虚拟化的机器人、虚拟化的传感器,也包括虚拟化和仿真的服务对象,不仅可以计算机器人的运动状态,也可以计算实时传感结果,此外还可以计算医疗器械对组织器官的作用效果。医患系统同时也将医生和病患纳入整个系统。

4.2 主要组成部分

平行医疗机器人的组成部分如图5所示。平行医疗机器人在传统意义上的医疗机器人上扩展了与之相对应的人工系统。实际系统由机器人及其工作对象、工作环境共同构成,包括机器人主体、控制系统、传感设备、显示设备、医疗仪器、造影设备、操作平台、实际医生和患者。人工系统包括机器人和传感设备的数学模型、仿真模型,也包括数字化、虚拟化的交互环境,即虚拟的组织结构,还包含实体化、仿真化的组织器官模型,即真实模拟组织。图6展示了人工系统的一种实现方式dV-Trainer^[53],与达芬奇手术机器人相对应,常用于训练使用达芬奇机器人的医护人员,文献[54]对其效果进行了调研和综述。

4.3 支撑技术

平行医疗机器人的支撑技术包括机器人学、机

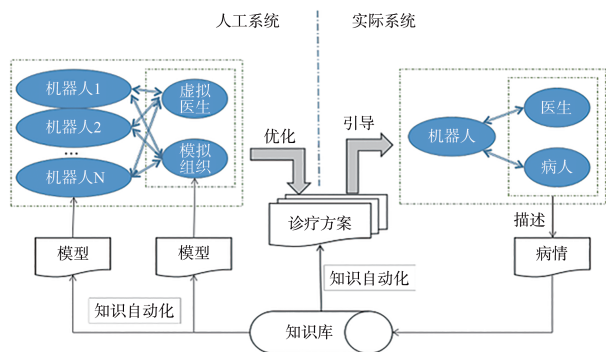
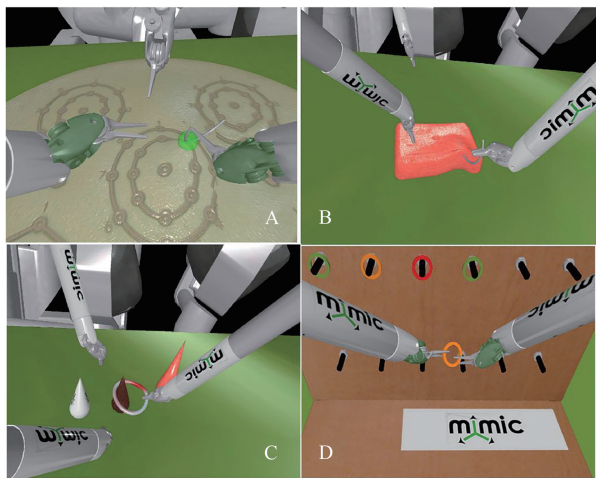


图5 平行医疗机器人的组成部分

图6 dV-Trainier 仿真训练场景^[53]

机器人仿真、生物力学、3D打印和知识自动化。其中医疗机器人的机器人学、机器人仿真与其他机器人并无不同，这里不再赘述，可参见文献[55]。生物力学、3D打印和知识自动化则是平行医疗机器人区别于一般机器人的支撑技术。

4.3.1 生物力学计算

对机器人的仿真，目前常用的方法主要通过物理仿真引擎仿真机器人在物理环境中的运动效果和传感结果，例如对无人机^[56]、机械臂抓取^[57]的仿真。这些仿真引擎侧重于对刚体的接触力的精确表述和计算速度提升。通常，对于软体结构或流体，这些机器人仿真引擎难以建模，一般将参数化的数学表达作为插件^[58]，将其实时运算结果视为一种刚体受力，纳入整个计算链路。然而，这种方式只能对整体进行受力分析，而无法描述软体或流体在受力后发生的形变或物理性质改变。

对于医疗机器人场景，人体的机体组织受力后产生运动效应和形变效应，进而导致复杂的生理功能变化^[59]。生物力学方法通过研究生物体的形态

学、解剖学、组织结构、材料结构和超微结构，以实验测定手段建立本构方程，然后依据物理定律推导出微分方程，从而以解析法或数值法求解。

有限元（FE）方法是生物力学仿真中的常用方法，多用于对组织形变仿真，常用于伤口缝合仿真^[60]、关节力学分析^[61]等。统计机器学习方法也可以用于生物力学仿真，以数据驱动的方式，通过大量采集力学数据^[62]，构建描述生物力学模型的回归模型，此类方法可用于对肿瘤的生物力学仿真^[63]。对于肢体，可建模肌肉-骨骼模型，将肌肉视为弹簧，骨骼结构视为多体，以此仿真肢体的运动学和动力学特性^[64]。

4.3.2 3D打印

传统的机器人机械结构一般采用铸模方式制造，开发过程冗长。对于精细、镂空的结构来说，其制造过程复杂。而3D打印，又称加性制造，是解决这些问题的有效手段。通过3D打印可以在较短时间内以较低成本直接将CAD模型转化为实体对象，缩短医疗机器人原型验证时间。对于非常规构型的医疗机器人，例如用于腹腔镜微创手术的蛇形机器人^[65]，其多节机构必须通过3D打印方式才能实现。在有电磁辐射场景下^[66]，3D打印材料的MRI相容性使其比使用传统制造方法更有优势。

同时，3D打印对于个性化定制极为重要。针对不同病患，定制化的医疗设备，如植入物、矫形器、假肢等，往往比通用产品对病患更友好。传统方法依赖医生通过经验在已有的通用医疗器械上进行增补，以适应病人需求，而3D打印方法则可通过虚拟化设计，将患者需求转化为实际医疗器械，在精度、准确度方面更有保证，同时也减轻了医生负担^[67]。可以说，3D打印技术可以为医疗机器人提供定制化的医疗仪器设备。另外，使用3D打印的一次性医疗设备，如超声探头，在成本上优于传统灭菌方法^[68]。

对于医疗机器人的实验，一般不止停留在仿真计算环节，至少还要再通过动物实验和组织器官实验，方可进入临床实验阶段。其中，组织器官实验一般使用捐献的器官，数量有限、有效期短、保存成本高。通过3D打印技术打印的模拟器官，具备与真实器官类似的生物力学特性^[69]，可以用于医疗机器人的验证实验^[70]，亦可用于对医生的操作培训^[71]。

综上所述，3D打印技术在平行医疗机器人的

原型制造、模拟实验、定制化、培训的各个环节都有很深刻的应用价值。

4.3.3 知识自动化

知识自动化狭义上理解为基于知识的服务,包括基于信息的服务、基于任务的服务、基于决策的服务等。广义上,知识自动化可以理解为一种改变知识产生、获取、分析、实施的自动化方法^[42]。实现知识自动化的一种方式构建知识图谱,涉及知识获取、知识表示、知识存储、知识融合、知识建模、知识计算、知识运维技术。

平行医疗机器人的服务对象包括医生和患者,其连接医疗大数据和计算实验。平行医疗机器人通过数据挖掘、知识图谱、自然语言理解、图像识别与理解、智能规划、专家系统、机器学习、平行学习^[52]等方法,主动探寻病人需求,为医生提供参考方案,给出预期干预结果和风险预期。从病患的病例信息出发,结合医疗知识库分析推理,得到病理治疗知识,这是对知识的自动化过程。

在平行医疗机器人的知识自动化过程中,构建人工场景进行计算实验是关键一环。在分析出患者病症,获得医学图像或化验分析结果后,系统调用模型库,生成包含医疗机器人、辅助医疗设备、病患肢体或腹腔虚拟结构的人工场景。然后使用医生专家系统得到备选医疗方案,基于智能规划方法进行计算实验,以大量实验计算的方式评估干预效果。

4.4 核心功能

平行医疗机器人是为医患服务的,将医生诊断、分析、治疗3个过程转化为平行学习^[72]的描述、预测、引导。这3个过程在流程上反馈闭环,功能上相对独立。

4.4.1 描述

平行医疗机器人的描述是指通过传感(造影、采样、化验),建立对病人信息全面描述的过程。描述过程是一个对病人进行“用户画像”的过程,综合考虑病人的实时检验化验报告和既往病史,结合知识库,对病人的发病过程和发病情况做出全面分析。描述过程不仅对病情本身进行刻画,也对治疗情景进行模拟,结果可以用于计算实验,也可以用于引导医生的手术过程。为了满足计算实验的条件,描述过程还应包括对治疗环境、治疗设备的精细建模。为了引导医生,描述过程还应利用化验和造影信息,结合医疗知识库,对病人的器官和腹腔

进行可视化建模,以VR/AR方式向医生展示,并以三维可视化方式演示手术计划^[54]。

4.4.2 预测

平行医疗机器人的预测是指通过计算实验,对医疗过程中的状态和结果做出预测的过程。传统意义上,医生对病患治疗结果的预期往往出于经验,然而病患体质各不相同,可能存在误差。另外,医患沟通一直是医疗界的难题,医生往往没有时间向患者充分解释治疗的预期结果,从而引发医疗纠纷。平行医疗机器人的“预测”功能用计算实验估计治疗结果,能够将各个阶段可视化展示给医生和病人,既帮助医生分析治疗过程,又便于医生与患者沟通。

4.4.3 引导

平行医疗机器人的“引导”是指通过分析预期结果,给出诊疗方案^[73],针对医疗过程各个阶段生成预案,并引导治疗过程沿预定轨道进行。以机器人手术为例,在手术备案阶段,系统通过对病症的描述,生成人工手术场景,通过计算可行的手术方案,向医生推荐若干方案。“引导”的突出优势在于对紧急情况充分备案。通过知识自动化和术前模拟实验,系统已获得大量紧急情况案例,在手术进行中,当紧急情况发生时,系统可以结合实时结果,在远程进行大量模拟实验,快速分析紧急应对策略并推荐给医生,以中断的方式将紧急处理方案插入手术流程,并通过VR/AR等三维可视化交互手段^[54],引导医生按计划完成手术^[74]。

5 平行医疗机器人的典型应用——食道超声机器人

心血管微创介入手术中实时超声成像主要是通过一个由食道进入人体内部的超声内窥探头完成的,即经食道超声心动图监测(trans-esophageal echocardiography)。该成像方式所用装置被称为经食道超声探头,是一个具有超声换能器、柔性内窥结构、手柄控制端及手轮的介入成像设备。手术过程中,该装置的使用需要一个熟练的操作者长时间控制并操作超声探头,这样的要求使得超声操作者会长时间暴露在协同成像的X射线电离辐射之下。此外,经食道超声对心脏成像具有较多特定切面及视角,但临床训练极具挑战,有经验的操作者数量有限,无论在我国还是西方医疗较发达的国家都属于极其依赖于经验的临床操作。

针对以上问题,王双翌设计了世界首例经食道超声机器人系统(robotic trans-esophageal ultrasound system)^[75]。如图7所示,该机器人为四自由度附加型机器人,可控制商用经食道超声探头在食道内前进、旋转与弯折,在概念上实现了经食道超声设备的远程操控。此外,一些研究通过Unity软件构建了模拟真实环境经食道超声机器人控制及图像采

集的数字虚拟平台,即经食道超声机器人虚拟视角平台。该平台通过机器人运动学控制模块仿真机器人系统运动功能,并通过导入CT或核磁共振获得病人的三维心脏及食道结构,通过对图形切片获得超声探头的仿真信号。经食道超声机器人及其虚拟视角平台共同构成初级的平行医疗机器人系统,由此实现术前规划和导航优化功能。

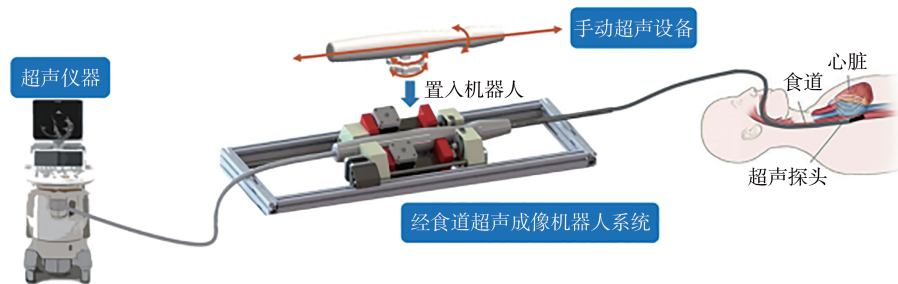


图7 经食道超声机器人系统

在病人手术前通过CT或核磁共振等检测技术获得三维心脏及食道结构,该平台加载并可视化展示所建立的超声探头运动学模型,然后生成视角切面图像(如图8所示)。针对经食道超声特定标准切面,该数字环境可加载相应算法,通过对病人心脏结构数据与标准心脏数据进行配准和优化机器人运动参数^[76],在手术前自动实现多个标准切面的定位,并获得到达目标位置的机器人参数,以供在术中有效操控机器人,实现图像采集及手术监控,由此实现医疗机器人的描述功能。

动力学和参数优化方法,实时分析计算从当前位置到达目标探头位置的机器人参数变化。该平台配合机器人的使用,潜在减少了操作者对经食道超声心动扫描经验的依赖,起到了远程遥操作下对超声医师及麻醉师的有效辅助作用,通过仿真实验进行参数优化就是医疗机器人的预测功能。

该研究工作后续利用所生成的切面视角及基于PLUS(即用于超声成像研究的公共软件库)^[79]的仿真成像算法,生成虚拟超声图像(如图9所示),更真实地模拟了经食道超声机器人的使用环境,并利用3D切片器实现了导航平台与Matlab、Python等软件的交互、与基于光学及磁场的位置追踪系统的接口以及与超声仪器的图像传递,进一步提升了该虚拟平台的功能性,为进一步的算法开发、实时导航、临床机器人使用训练及新操作方法探索提供有力的支持。

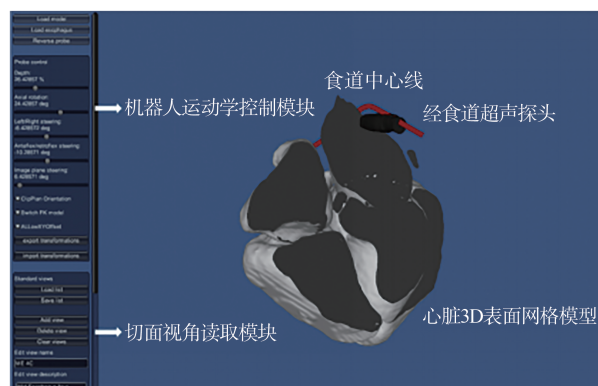


图8 基于Unity开发的经食道超声机器人虚拟环境及交互性操作界面
(当前所展示切面为位于食道中部的四心腔切面)

此外,基于该数字虚拟平台,一些研究提出了基于多模态图像配准和磁场位置传感器的追踪导航方法与视角自适应优化方法^[77-78],旨在手术中通过虚拟视角平台标记当前超声探头位置,利用反向运

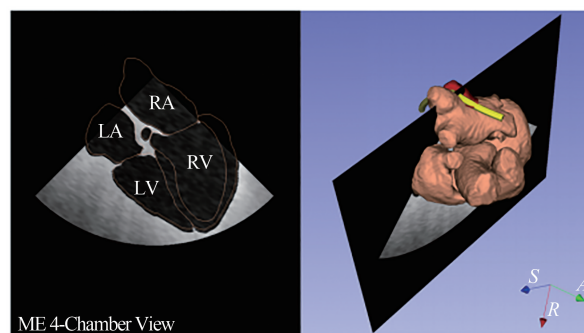


图9 经食道超声机器人样机系统及使用场景

6 结束语

医疗机器人是医学、机器人学共同关注的重点领域, 有很强的社会应用价值和科研价值。本文将平行系统理论与医疗机器人结合, 提出了基于ACP的平行医疗机器人, 阐述了平行医疗机器人的支撑技术, 介绍了描述、预测、引导3个核心功能, 并以机器人辅助手术为例描述了核心流程。最后以经食道超声机器人为例, 展示了平行医疗机器人的实现方法和应用价值。可以认为, 随着人工智能技术在医学领域的逐渐深入应用, 平行医学^[80-81]、数字医学^[82]将进一步推动智能与医学的有机融合。

参考文献:

- [1] RAO P P. Robotic surgery: new robots and finally some real competition[J]. *World Journal of Urology*, 2018, 36(4): 537-541.
- [2] ALLETTI S G, ROSSITTO C, CIANCI S, et al. The Senhance™ surgical robotic system (“Senhance”) for total hysterectomy in obese patients: a pilot study[J]. *Journal of Robotic Surgery*, 2018, 12(2): 229-234.
- [3] 张思锋, 张泽滴. 中国养老服务机器人的市场需求与产业发展[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2017, 37(5): 49-58.
ZHANG S F, ZHANG Z H. Market demand, industrial base and development of aged service robot[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2017, 37(5): 49-58.
- [4] MOGLIA A, FERRARI V, MORELLI L, et al. A systematic review of virtual reality simulators for robot-assisted surgery[J]. *European Urology*, 2016, 69(6): 1065-1080.
- [5] GUIOCHET J, MACHIN M, WAESELYNCK H. Safety-critical advanced robots: a survey[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 94: 43-52.
- [6] 王晓娣, 方旭红. 医疗机器人伦理风险探析[J]. *自然辩证法研究*, 2018, 34(12): 64-69.
WANG X D, FANG X H. The study on the ethical risks of medical robots[J]. *Studies in Dialectics of Nature*, 2018, 34(12): 64-69.
- [7] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 485-489, 514.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [8] 白天翔, 沈震, 刘雅婷, 等. 平行机器: 一种智能机器的管理与控制框架[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(2): 181-191.
BAI T X, SHEN Z, LIU Y T, et al. Parallel machine: a framework for the control and management for intelligent machines[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 181-191.
- [9] 白天翔, 王帅, 沈震, 等. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用[J]. *自动化学报*, 2017, 43(2): 161-175.
BAI T X, WANG S, SHEN Z, et al. Parallel robotics and parallel unmanned systems: framework, structure, process, platform and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(2): 161-175.
- [10] 王飞跃. 机器人的未来发展: 从工业自动化到知识自动化[J]. *科技导报*, 2015, 33(21): 39-44.
WANG F Y. The future development of robots: from industrial automation to knowledge automation[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(21): 39-44.
- [11] 闫志远, 梁云霄, 杜志江. 腹腔镜手术机器人技术发展综述[J]. *机器人技术与应用*, 2020(2): 24-29.
YAN Z Y, LIANG Y L, DU Z J. Summary of the development of laparoscopic surgery robot technology[J]. *Robot Technique and Application*, 2020(2): 24-29.
- [12] MATANES E, LAUTERBACH R, BOULUS S, et al. Robotic laparoscopic single-site surgery in gynecology: a systematic review[J]. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, 2018, 231: 1-7.
- [13] REILEY C E, AKINBIYI T, BURSCHKA D, et al. Effects of visual force feedback on robot-assisted surgical task performance[J]. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2008, 135(1): 196-202.
- [14] MASAYA, KITAGAWA, MS, et al. Effect of sensory substitution on suture-manipulation forces for robotic surgical systems[J]. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2005, 129(1): 151-158.
- [15] NIU G J, PAN B, ZHANG F H, et al. Dimensional synthesis and concept design of a novel minimally invasive surgical robot[J]. *Robotica*, 2018, 36(5): 715-737.
- [16] WANG W, LI J M, WANG S X, et al. System design and animal experiment study of a novel minimally invasive surgical robot[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2016, 12(1): 73-84.
- [17] KIM U, LEE D H, KIM Y B, et al. S-surge: novel portable surgical robot with multi-axis force-sensing capability for minimally invasive surgery[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1717-1727.
- [18] SAADEH Y, VYAS D. Nanorobotic applications in medicine: current proposals and designs[J]. *American Journal of Robotic Surgery*, 2014, 1(1): 4-11.
- [19] MARTEL S. Swimming microorganisms acting as nanorobots versus artificial nanorobotic agents: a perspective view from an historical retrospective on the future of medical nanorobotics in the largest known three-dimensional biomicrofluidic networks[J]. *Biomicrofluidics*, 2016, 10(2): 021301.
- [20] BI C. Design of magnetic tumbling microrobots for complex environments and biomedical applications[D]. West Lafayette: Purdue University Graduate School, 2019.
- [21] RASSWEILER J J, AUTORINO R, KLEIN J, et al. Future of robotic surgery in urology[J]. *BJU international*, 2017, 120(6): 822-841.
- [22] ZUO S Y, WANG S X. Current and emerging robotic assisted intervention for Notes[J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2016, 13(12): 1095-1105.
- [23] KALLOO A N, SINGH V K, JAGANNATH S B, et al. Flexible transgastric peritoneoscopy: a novel approach to diagnostic and therapeutic interventions in the peritoneal cavity[J]. *Gastrointestinal Endoscopy*, 2004, 60(1): 114-117.
- [24] RAO G V. Transgastric appendectomy in humans[C]//*Proceedings of Oral Presentation at Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons (SAGES) Conference*. [S.l.:s.n.], 2006.
- [25] BECKER B C, VOROS S, MACLACHLAN R A, et al. Active guidance of a handheld micromanipulator using visual servoing[C]//*Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 339-344.
- [26] ZUO S Y, HUGHES M, YANG G Z. Novel balloon surface scanning device for intraoperative breast endomicroscopy[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2016, 44(7): 2313-2326.
- [27] KOBAYASHI Y, SEKIGUCHI Y, NOGUCHI T, et al. Development of a robotic system with six-degrees-of-freedom robotic tool manipulators for single-port surgery[J]. *The International Journal of Medical*

- Robotics and Computer Assisted Surgery, 2015, 11(2): 235-246.
- [28] PETTERSSON A, DAVIS S, GRAY J O, et al. Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(3): 332-338.
- [29] KESNER S B, HOWE R D. Force control of flexible catheter robots for beating heart surgery[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1589-1594.
- [30] VERCAUTEREN T, PERCHANT A, MALANDAIN G, et al. Robust mosaicing with correction of motion distortions and tissue deformations for in vivo fibered microscopy[J]. Medical Image Analysis, 2006, 10(5): 673-692.
- [31] KIM Y J, CHENG S B, KIM S, et al. Design of a tubular snake-like manipulator with stiffening capability by layer jamming[C]//Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2012: 4251-4256.
- [32] ZUO S Y, MASAMUNE K, KUWANA K, et al. Nonmetallic rigid-flexible outer sheath with pneumatic shapelocking mechanism and double curvature structure[M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 169-177.
- [33] ZARAHN E, ALON L, RYAN S L, et al. Prediction of motor recovery using initial impairment and fMRI 48 h poststroke[J]. Cerebral Cortex, 2011, 21(12): 2712-2721.
- [34] CURT A, VAN HEDEL H J A, KLAUS D, et al. Recovery from a spinal cord injury: significance of compensation, neural plasticity, and repair[J]. Journal of Neurotrauma, 2008, 25(6): 677-685.
- [35] GASSERT R, DIETZ V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective[J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2018, 15(1): 1-15.
- [36] LI Q L, SONG Y, HOU Z G. Estimation of lower limb periodic motions from sEMG using least squares support vector regression[J]. Neural Processing Letters, 2015, 41(3): 371-388.
- [37] GUO S X, ZHANG F, WEI W, et al. Kinematic analysis of a novel exoskeleton finger rehabilitation robot for stroke patients[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2014: 924-929.
- [38] IQBAL J, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. Human hand compatible underactuated exoskeleton robotic system[J]. Electronics Letters, 2014, 50(7): 494-496.
- [39] 孙睿, 宋嵘, 汤启宇. 肌电控制康复机器人协助的脑卒中患者肘关节康复训练的多参数评价[J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(9): 802-807.
- SUN R, SONG R, TANG Q Y. Quantitative evaluation of motor function recovery process in chronic stroke patients during myoelectric controlling robot-assisted elbow training[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2012, 27(9): 802-807.
- [40] 侯增广, 赵新刚, 程龙, 等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1765-1779.
- HOU Z G, ZHAO X G, CHENG L, et al. Recent advances in rehabilitation robots and intelligent assistance systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(12): 1765-1779.
- [41] FLEISCHER C, KONDAK K, WEGE A, et al. Research on Exoskeletons at the TU Berlin[M]//KRÖGER T, WAHL FM. Advances in Robotics Research. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 335-346.
- [42] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 1-8.
- WANG F. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 1-8.
- [43] 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法[J]. 中国基础科学, 2004, 6(5): 3-10.
- WANG F Y. Computational theory and method on complex system[J]. China Basic Science, 2004, 6(5): 3-10.
- [44] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(2): 26-34.
- WANG F Y. On the modeling, analysis, control and management of complex systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(2): 26-34.
- [45] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 293-302.
- WANG F. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 293-302.
- [46] 王飞跃. 人工社会, 计算实验, 平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
- WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [47] 熊刚, 王飞跃, 邹余敏, 等. 提升乙烯长周期生产管理的平行评估方法[J]. 控制工程, 2010, 17(3): 401-406.
- XIONG G, WANG F Y, ZOU Y M, et al. Parallel evaluation method to improve long period ethylene production management[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(3): 401-406.
- [48] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LV Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [49] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [50] WANG K, GOU C, ZHENG N, et al. Parallel vision for perception and understanding of complex scenes: methods, framework, and perspectives[J]. Artificial Intelligence Review, 2017, 48: 299-329.
- [51] WEI Q, LI H, WANG F Y. Parallel control for continuous-time linear systems: a case study[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(4): 919-928.
- [52] LI L, LIN Y, ZHENG N, et al. Parallel learning: a perspective and a framework[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3): 389-395.
- [53] KENNEY P A, WSZOLEK M F, GOULD J J, et al. Face, content, and construct validity of dV-trainer, a novel virtual reality simulator for robotic surgery[J]. Urology, 2008, 73(6): 1288-1292.
- [54] MOGLIA A, FERRARI V, MORELLI L, et al. A systematic review of virtual reality simulators for robot-assisted surgery[J]. European Urology, 2016, 69(6): 1065-1080.
- [55] ROBOTICS S. Most advanced robotics simulation software overview [J]. Smashing Robotics. 2016.
- [56] TAKAYA K, ASAI T, KROUMOV V, et al. Simulation environment for mobile robots testing using ROS and Gazebo[C]//Proceedings of 2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 96-101.
- [57] QIAN W, XIA Z Y, XIONG J, et al. Manipulation task simulation using ROS and Gazebo[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014). Piscataway: IEEE Press, 2015: 2594-2598.
- [58] BURRI M, NIKOLIC J, GOHL P, et al. The EuRoC micro aerial vehicle datasets[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35

- (10): 1157-1163.
- [59] A HOLZAPFEL G, OGDEN R W. Biomechanics: trends in modeling and simulation[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [60] CHANDA A, RUCHTI T, UNNIKRISHNAN V. Computational modeling of wound suture: a review[J]. IEEE reviews in biomedical engineering, 2018, 11: 165-176.
- [61] KANG K T, KOH Y G, SON J, et al. Influence of increased posterior tibial slope in total knee arthroplasty on knee joint biomechanics: a computational simulation study[J]. The Journal of Arthroplasty, 2018, 33(2): 572-579.
- [62] BLÁZQUEZ-CARMONA P, SANZ-HERRERA J A, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ F J, et al. Structural optimization of 3D-printed patient-specific ceramic scaffolds for in vivo bone regeneration in load-bearing defects[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 121: 104613.
- [63] VIGNALI E, GASPAROTTI E, CAPELLINI K, et al. Modeling biomechanical interaction between soft tissue and soft robotic instruments: importance of constitutive anisotropic hyperelastic formulations [J]. The International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1): 224-235.
- [64] ZHOU L, LI Y, BAI S. A human-centered design optimization approach for robotic exoskeletons through biomechanical simulation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 91: 337-347.
- [65] MAEDA M, KANAI N, KOBAYASHI S, et al. Endoscopic cell sheet transplantation device developed by using a 3-dimensional printer and its feasibility evaluation in a porcine model[J]. Gastrointestinal Endoscopy, 2015, 82(1): 147-152.
- [66] EPAMINONDA E, DRAKOS T, KALOGIROU C, et al. MRI guided focused ultrasound robotic system for the treatment of gynaecological tumors[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2016, 12(1): 46-52.
- [67] CULMONE C, SMIT G, BREEDVELD P. Additive manufacturing of medical instruments: a state-of-the-art review[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 461-473.
- [68] WALKER J M, ELLIOTT D A, KUBICKY C D, et al. Manufacture and evaluation of 3-dimensional printed sizing tools for use during intraoperative breast brachytherapy[J]. Advances in Radiation Oncology, 2016, 1(2): 132-135.
- [69] MELNYK R, EZZAT B, BELFAST E, et al. Mechanical and functional validation of a perfused, robot-assisted partial nephrectomy simulation platform using a combination of 3D printing and hydrogel casting[J]. World Journal of Urology, 2020, 38(7): 1631-1641.
- [70] ÖPIK R, HUNT A, RISTOLAINEN A, et al. Development of high fidelity liver and kidney phantom organs for use with robotic surgical systems[C]//Proceedings of 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). Piscataway: IEEE Press, 2012: 425-430.
- [71] AIMAR A, PALERMO A, INNOCENTI B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art[J]. Journal of Healthcare Engineering, 2019: 5340616.
- [72] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 等. 平行学习——机器学习的一个新型理论框架[J]. 自动化学报, 2017, 43(1): 1-8.
LI L, LIN Y L, CAO D P, et al. Parallel learning - a new framework for machine learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(1): 1-8.
- [73] 王飞跃, 李长贵, 国元元, 等. 平行高特: 基于 ACP 的平行痛风诊疗系统框架[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(12): 1057-1068.
WANG F Y, LI C G, GUO Y Y, et al. Parallel gout: an ACP-based system framework for gout diagnosis and treatment[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 30(12): 1057-1068.
- [74] 王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 等. 平行手术: 基于 ACP 的智能手术计算方法[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(11): 961-970.
WANG F Y, ZHANG M, MENG X B, et al. Parallel surgery: an ACP-based approach for intelligent operations[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 30(11): 961-970.
- [75] WANG S, HOUSDEN J, SINGH D, et al. Design, testing and modeling of a novel robotic system for trans-oesophageal ultrasound[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2016, 12(3): 342-354.
- [76] WANG S, SINGH D, JOHNSON D, et al. Robotic ultrasound: view planning, tracking, and automatic acquisition of transesophageal echocardiography[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2016, 23(4): 118-127.
- [77] WANG S, SINGH D, LAU D, et al. Probe tracking and its application in automatic acquisition using a trans-esophageal ultrasound robot[C]//Proceedings of Computer-Assisted and Robotic Endoscopy: Third International Workshop. Heidelberg: Springer, 2017: 14-23.
- [78] WANG S, HOUSDEN J, ZAR A, et al. Strategy for monitoring cardiac interventions with an intelligent robotic ultrasound device[J]. Micromachines, 2018, 9(2): 65.
- [79] LASSO A, HEFFTER T, RANKIN A, et al. PLUS: open-source toolkit for ultrasound-guided intervention systems[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 61(10): 2527-2537.
- [80] 王飞跃. 平行医学: 从医学的温度到智慧的医学[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(1): 1-9.
WANG F Y. Parallel medicine: from warmth of medicare to medicine of smartness[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(1): 1-9.
- [81] 王拥军, 王飞跃, 王戈, 等. 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统[J]. 自动化学报, 2021, 47(11): 2585-2599.
WANG Y J, WANG F Y, WANG G, et al. Parallel hospitals: from hospital information system (HIS) to hospital smart operating system (HSOS)[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(11): 2585-2599.
- [82] 王飞跃. 数字医生与平行医疗: 从医疗知识自动化到系统化智能医学[J]. 协和医学杂志, 2021, 12(6): 829-833.
WANG F Y. Digital doctors and parallel healthcare: from medical knowledge automation to intelligent metasystems medicine[J]. Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital, 2021, 12(6): 829-833.

[作者简介]

白天翔 (1991-), 男, 航天科工集团智能科技研究院有限公司工程师, 主要研究方向为群体智能博弈、强化学习、人机协同等。

王双翌 (1991-), 男, 中国科学院自动化所研究员, 主要研究方向为医疗机器人和计算机辅助手术。

刘雅婷 (1992-), 女, 博士, 航天科工集团智能科技研究院有限公司工程师, 主要研究方向为计算机视觉、多目标跟踪、轨迹预测等。

李汉忠 (1951-), 男, 北京协和医院泌尿外科教授、博士生导师, 泌尿外科学术带头人、国务院政府特殊津贴获得者。北京协和医学院外科学系主任, 香港大学医学部荣誉教授。科鹏外科经自然通道手术机器人创始人, 成功研发经自然通道手术机器人系列产品。

闻艺 (1961-), 男, 北方自动控制技术研究所资深研究员, 主要研究方向为平行系统、平行智能、社会计算、知识自动化。