

DOI: 10.13376/j.cbbls/2022107

文章编号: 1004-0374(2022)08-0965-09



陈小平, 中国科学技术大学计算机科学与技术学院教授, 机器人实验室主任, 中国人工智能学会人工智能伦理治理工委主委, 全球人工智能理事会执行委员。主要研究方向为人工智能基础理论和智能机器人关键技术, 近年来致力于融合性原理和开放知识的理论研究和系统性工程验证, 以及人工智能伦理治理的研究与教学。曾获中国科学技术大学“杰出研究”校长奖、IEEE ROBIO 最佳论文奖、世界人工智能联合大会最佳自主机器人奖、通用机器人技能奖和助老机器人比赛第一名, 以及机器人世界杯 12 项世界冠军等荣誉。

跨学科视野下医疗机器人的进展与挑战

陈小平

(中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 合肥 230027)

摘要: 医疗机器人是一个涉及众多学科和医疗应用, 正在加快崛起的新型交叉领域。本文面向多学科需求, 基于当前发展状况, 梳理医疗机器人的分类、概念/原理、进展和挑战。医疗机器人的传统定义已不符合领域现状和趋势, 本文将医疗机器人重新定义为基于机器人系统架构的, 由五种基本功能组成的人机混合系统, 进而概括出适用于不同种类医疗机器人的一般性工作原理, 并在统一的概念框架上, 系统地组织来自众多学科的相关技术和服务于各种医疗目的的应用。

关键词: 医疗机器人; 机器人技术; 人工智能; 功能体系; 医疗

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Advancement and challenges of medical robots from an interdisciplinary viewpoint

CHEN Xiao-Ping

(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Medical robot is a fastest growing field involving many related disciplines and medical applications. To meet the needs from multi-disciplines and based on the state-of-the-art achievements of the field, the classification, concept/principle, progress and challenges of medical robots are clarified in this paper. The traditional definition of medical robot no longer fits to the current status and the trend of the field; therefore, it is redefined as a man-machine hybrid system which is composed of five basic functions and based on the technological architecture of robotics. On the unified conceptualization, the general working principles suitable for all kinds of existing medical robots are remoulded, also technologies from related disciplines and applications for various medical purposes are systematically organized.

Key words: medical robots; robotics; AI; functional architecture; medical treatment/care

收稿日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(92048301, U1613216)

通信作者: E-mail: xpchen@ustc.edu.cn

人类对医疗机器人的需求正在全球范围内快速增长,新研究、新成果、新产品和新应用也在国内外不断涌现,相关人群来自众多专业(医学、机器人技术、AI、图像处理、传感器、IT、VR/AR、遥操作等)和行业(医疗、康复、医疗设备、特种机器人和服务机器人等),涉及医疗机器人的使用(如医生、治疗师和非专业用户)、研究、开发、教学(专业教师和学生)、制造和维护等等。医疗机器人正处于加快崛起的进程之中。

从医疗应用的角度,已出现大量有关医疗机器人的科普介绍和行业报告;从机器人技术角度,也出现了一些面向机器人技术专业人员的综述文章和专著^[1-5]。本文从学科交叉的需求出发,面向医疗机器人的各类相关人群,对医疗机器人进行一次新的梳理,以适应医疗机器人发展的新形势,促进不同相关人群之间的相互理解、交流合作和人才培养。

近年来,医疗机器人的发展呈现出种类增多、用途和技术变化跨度增大的新特点。本文首先梳理医疗机器人的分类,进而梳理医疗机器人的概念、进展和挑战。将医疗机器人定义为硬件设备的传统观点已不适应领域发展的新形势,本文将医疗机器人重新定义为一种功能体系,进而概括出适用于不同种类医疗机器人的一般性工作原理。依据上述分类和定义,介绍医疗机器人的国内外发展状况,以及未来趋势和主要技术挑战。

1 分类

依据用途的不同,医疗机器人可划分为手术机器人、医疗辅助机器人、康复机器人和医院服务机器人四大类,每一大类又可细分为多个小类(表1)。不过,某些大类之间的边界和一些大类中小类的细分目前仍不明晰,尚未形成共识。随着新型医疗机器人的不断涌现,这种情况将持续存在,分类也会

不断完善。

1.1 手术机器人

手术机器人目前主要有腔镜手术、骨科手术、神经外科手术和血管介入手术机器人四个小类。腔镜手术机器人的应用范围包括心脏外科、普通外科、泌尿外科、胸外科、肝胆胰外科、胃肠外科、妇科等,如胆囊切除术、淋巴结清扫术、前列腺癌根治术等。骨科手术机器人主要应用范围包括脊柱外科和关节外科,如膝关节置换和髋关节置换手术。神经外科手术机器人主要适用于脑和脊髓神经系统疾病的手术治疗,如脑出血、脑肿瘤、帕金森病、癫痫、三叉神经痛等,具有非常高的危险系数和精度要求。血管介入手术机器人主要用于血管成形术(如冠脉支架术、颈动脉支架术、肾动脉支架术、脑动脉支架术)和血管介入电生理治疗(如房颤消融)。四小类手术机器人在机器人技术方面有很高的相似度,主要差异在于执行功能(见第2节)使用的末端执行器的不同。

1.2 医疗辅助机器人

医疗辅助机器人是在医疗中起辅助作用的机器人,如用于医学检查的胶囊胃镜和活检机器人、用于采血的机器人、用于输液调配的机器人等。值得注意的是,不同种类的医疗辅助机器人在机器人技术方面差异很大,比如用于活检的机器人与胶囊胃镜机器人分属机器人技术的不同领域,却与手术机器人更为相似。

1.3 康复机器人

根据WHO的定义,康复的目的是帮助存在健康缺陷的人改善功能、降低失能,以便更好地生活和工作^[6]。据此定义,康复机器人分为两个小类^[7]:康复治疗机器人和功能辅助机器人。康复治疗机器人用于帮助患者从身心创伤中得到恢复(或部分恢复),即以治疗为目的;功能辅助机器人是患者的

表1 医疗机器人分类

一级分类	二级分类	说明和举例
手术机器人	腔镜手术机器人	胆囊切除术、前列腺癌根治术
	骨科手术机器人	膝关节置换术、髋关节置换术
	神经外科手术机器人	脑出血、脑肿瘤、帕金森病、癫痫
	血管介入手术机器人	冠脉支架术、颈动脉支架术、房颤消融术
医疗辅助机器人		胶囊胃镜、活检、采血、输液调配
康复机器人	康复治疗机器人	运动功能康复、认知功能(如孤独症/自闭症)辅助治疗
	功能辅助机器人	智能假肢、智能辅助机械臂、智能轮椅、外骨骼机器人、导盲机器人、智能护理床、喂食机器人、陪护机器人等
医院服务机器人		物流配送、消毒杀菌、导医咨询

生活和工作助手，不以治疗为目的，而是用机器人补偿、替代患者失去的部分功能。康复治疗机器人又分为两个子类：运动功能康复和认知功能康复。

1.4 医院服务机器人

医院服务机器人实际上从属于通常意义的服务机器人，但其应用限于医院和医疗环境，如用于物流配送（送药、送餐、送器械、回收被服和医疗垃圾等）、药品分拣、配药、消毒杀菌、导医咨询等。医院服务机器人是服务机器人的一个子类，但医院环境与其他很多应用环境存在较大区别，比如对于物流配送而言，医院部分环境的复杂程度和动态程度更高、可预测性更低，因而具有更大的技术挑战性。

2 功能体系与工作原理

传统工业机器人的定义立足于硬件装置（机械臂），医疗机器人的传统定义延续了这种定义法。然而，医疗机器人必需的一些关键性基本功能是由人承担的，而且这种情况在可预见的未来不会发生根本性改变（见第4节），还有一些功能需要医疗影像设备和计算机软硬件的支持。因此，本文将医疗机器人定义为机器人系统架构上的功能体系，其中部分功能的实现以软硬设备为主、以人为辅，另一部分功能的实现则以人为主、以软硬设备为辅，各项功能的协调运作将完成医疗机器人的预定任务。所以，医疗机器人是人机混合的功能系统。从功能观点出发，才可以形成医疗机器人的完整认识。

覆盖表1中的各种类型，医疗机器人的功能体系包含5种基本功能——感知、信息、规划、执行和控制，它们之间具有稳定的相互关系（图1），这些基本功能及其相关关系决定了医疗机器人的一般性工作原理，尽管在不同类型的医疗机器人上，每种功能的具体内涵和作用可能存在区别，复杂程度也可能存在差异。有些功能是由硬件装置实现的，有些则需要人（如医生、治疗师）的参与，甚至由人起主导作用。五种功能及其相互关系的详细说明如下。

2.1 感知功能

医疗机器人的感知功能负责获取治疗所需的相关信息。患者信息通常是通过各种感知设备获取的，有时也需要借助于参与者（如医生、治疗师、患者）的直接观察，而一般性信息（如相关医学知识和统计信息）是通过信息化手段获得的。

常用的感知设备包括计算机断层扫描（CT）、

磁共振成像（MRI）、正电子断层扫描（EPT）、X射线、超声等医学影像设备，以及可见光相机、深度相机、激光相机等机器人传感器，也包括其他医学检查的测试结果。不同类型的医疗机器人所需的感知信息可能存在很大差别，比如手术机器人往往需要比其他类型的医疗机器人获取更多的患者信息，而用于物流配送的医院服务机器人需要获取工作环境的大量信息。

运用感知功能可以获得实时数据和非实时数据：非实时数据即治疗之前对患者进行的各项检查、化验的结果；实时数据即治疗过程中实时获取的信息。这些数据可直接用于控制功能，也可以通过数据功能进行分析处理，分析处理的结果用于控制功能和规划功能。因此，感知功能分别对控制功能和数据功能有输出，在图1中表示为从感知功能分别指向控制功能和数据功能的两个箭头。例如，手术机器人根据术前获取的非实时数据建立患者模型，患者模型可用于控制功能和规划功能；而在术中，利用实时数据实现患者模型与患者身上标记之间的配准，或对患者模型进行实时更新。

2.2 数据功能

医疗机器人的数据功能负责对来自感知功能（见图1从感知功能指向数据功能的箭头）的所有信息进行存储、分析处理和管理，这些数据不仅可以分为实时数据和非实时数据，还可分为患者信息和一般性信息。这些数据/信息大部分存储在医院的信息化平台上。

非实时数据是治疗前获取的患者信息和一般性信息，这些信息的最重要应用是根据治疗的需要，建立和更新患者的相关模型，其中涉及的典型技术问题包括：通过影像分割和多源数据融合构建患者

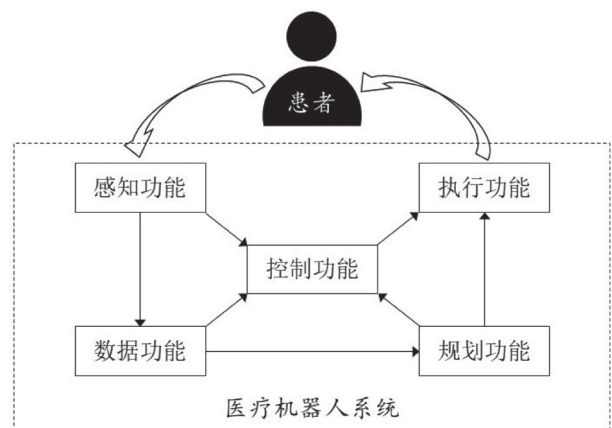


图1 医疗机器人系统功能体系示意图

模型(如患者身体相关组织的解剖模型);借助于生物力学模型,分析、预测组织变形;通过实时数据融合更新患者模型。

数据功能的输入不仅可以来自感知功能,有些情况下也来自控制功能产生的数据,比如记录控制信号以便于后续的数据分析(图1省略了对应的箭头)。数据功能的输出对象是控制功能和规划功能。

2.3 规划功能

医疗机器人的规划功能指的是:依据数据功能提供的相关信息,提前制定详细的治疗方案。目前,规划功能主要是由人(医生或治疗师等)承担的,医疗机器人系统为人的规划工作提供相关的辅助。

例如在脊柱手术之前,通过CT扫描等医学影像设备获取患者的相关数据(如图片等),从而得以解析患者的脊柱解剖结构,按节段识别、分割、标记每个独立椎体,从而构建患者模型。规划功能的工作是在患者模型和其他相关信息的基础上,提前制定详细的手术方案,包括确定在哪些节段的矢状面、冠状面或横断面需要嵌入椎弓根螺钉等,并在规划软件上完成相关参数的设计,从而形成完整的手术方案。对于康复机器人,规划功能的作用是针对患者情况预先制定康复练习方案。

规划功能对于医疗机器人(尤其手术机器人、康复机器人等)的作用十分明显。首先,可以更好地利用感知功能获取患者信息;其次,借助于规划软件,可以制定更准确、更稳妥的治疗(或康复练习)方案;再次,借助于提前制定的治疗方案,可以引导医生/治疗师更好地进行治疗,提高治疗质量。

多数情况下,规划功能产生的结果将输出给控制功能,为控制功能提供重要的辅助,如在手术过程中引导医生的操作;少数情况下,输出给执行功能,并被执行部件自动执行,如物流配送机器人的移动和康复治疗机器人的练习动作。

规划功能涉及的典型技术问题包括治疗方案的表示、治疗方案的优化、方案设计中不确定性的表示和处理。

2.4 执行功能

医疗机器人的执行功能接受来自控制功能(多数情况)的操作信号,或来自规划功能(少数情况)的操作指令,并自动完成操作信号对应的物理操作或操作指令对应的信息操作。

物理操作包括手术机器人的各种手术操作(如穿刺、止血、缝合等)、康复机器人的练习动作、物流配送机器人的移动、喂食机器人的喂食动作等。

用于认知功能辅助治疗的康复机器人往往通过与患者的对话和情感交流达到辅助治疗的目的,这种交流就属于信息操作。另外,很多医疗机器人在执行物理操作的过程中也伴随着语音提示,这也属于信息操作。信息操作通常事先由规划功能确定操作序列,在治疗过程中由机器人的执行部件自动地执行操作序列;物理操作一般是在人(医生或治疗师)的控制下进行的,而人的控制是通过医疗机器人系统的控制功能实现的。所以在图1中,执行功能有两个输入,分别来自规划功能和控制功能。

不同种类的物理操作需要采用不同的硬件执行机构,比如四类手术机器人的执行机构,尤其是末端执行器差别非常大。手术机器人的执行机构包含多条机械臂,相当于外科医生的手臂;每条机械臂装载不同的末端执行器,相当于外科医生的手和微型手术器械的一体化,如腔镜手术机器人的末端执行器包括手术刀、止血钳、内窥镜等,血管介入手术机器人的末端执行器有导丝、导管等,骨科手术机器人的末端执行器有骨钻等。机械臂某些方面的灵活度超过人,比如人手腕的上下翻转角度最多180度,而手术机器人的手腕可以自由旋转540度。

2.5 控制功能

除了个别类型之外,医疗机器人通常是在人的控制下完成相关操作的,医疗机器人为人的控制提供了多方面的重要辅助。事实上,人的控制及相关辅助共同构成医疗机器人的控制功能。

以腔镜手术机器人为例,在传统手术中,主刀医生直接用双手操纵手术器械,完成各种手术操作。腔镜手术机器人引入了主手-从手系统,主刀医生用双手操纵称为主手的智能化器械,这种器械实时地自动提取医生双手的动作信号,并立即传输给正在腔内工作的对应的从手(微型手术器械),从手根据动作信号模仿医生的操作动作,以完成手术操作。由于医生的双手不需要进入患者体内,而且机器人手术器械的尺寸远小于常规手术器械,使得手术切口显著缩小,开创了微创手术的新方向。在手术过程中,主刀医生可以从控制台看到当前视野中出现的人体器官组织和正在工作的微型手术器械的放大10~15倍的三维高清图像,远比肉眼可见的更加清晰,从而帮助主刀医生完成更精细、更准确的手术操作。

在图1所示的功能体系中,控制功能包含着决策功能,并且对多数类型的医疗机器人而言,决策功能是由人承担的。个别种类的医疗机器人(如物

流配送机器人、喂食机器人等)是自主决策和自主控制的,这些机器人在运行过程中不需要由人提供动作信号,而是由机器人的决策系统依据当前的感知信息以及规划功能提供的任务计划(如果有的话),决定机器人的下一步行动。

3 国内外发展状况

1997年,北京航空航天大学、清华大学和海军总医院联合开发了一款神经外科手术机器人^[8],其最新一代产品 Remebot 已投入临床使用。重庆金山科技集团研制的胶囊内窥镜系统 OMOM 于 2004 年初完成原理样机研制,2008 年起陆续进入部分地区医保,国内市场占有率超过 95%,国际市场占有率达 35%。北京天智航医疗科技股份有限公司于 2005 年起研制骨科机器人,于 2010 年获得国家医疗器械产品注册许可证,2015 年 11 月成为国内首家在新三板挂牌的医疗机器人企业。20 余年来,国内大批高校、科研院所和企业与医疗机构合作,共同投入医疗机器人的科研、研发、制造和应用,基本涵盖了医疗机器人的四大类及大部分小类,部分产品如表 2 所示。

1986 年,IBM 公司与加利福尼亚大学合作开发了一款髌骨置换手术系统,1992 年成立 ISS 公司并推出手术机器人系统 ROBODOC^[9]。1994 年,美国 Computer Motion 公司研制了腔镜手术机器人 AESOP-1000,1996 年推出微创手术机器人 ZUES,实现了从手操作对主手操作的等比例模拟^[10]。1995 年起,美国 Intuitive Surgical 公司在麻省理工学院相关成果的基础上,开始研制腔镜微创手术机器人“达芬奇”,1997 年第一代产品 IS1000 通过了美国 510K 认证,后续产品不断完善,实现了全球商业化应用推广。国外部分医疗机器人产品如表 3 所示。

4 发展趋势和技术挑战

为了在实际应用中进一步提升医疗机器人的性能,目前面临着如下技术挑战。

4.1 触觉反馈

在传统手术中,当主刀医生所持手术器械与患者组织发生有意无意的接触(如触碰、切割、缝合)时,医生会有触碰感(这在机器人技术领域被称为力反馈^[11]),这对医生的手术操作是非常有用的。然而,对于目前各种手术机器人而言,主刀医生无法通过主手-从手系统获得触碰感,只能借助于视觉(实时影像)以尽量弥补触碰感的缺失。相关研

究表明,没有力反馈的机器人系统可使患者组织的平均施加力幅值增加 50%,最大施加力至少增加 2 倍,增大了意外损伤事件的发生率^[12]。

研究提出使用三自由度力传感器以获取医生的手指握力^[13],但现有传感器的尺寸显著限制了医生手腕的运动范围,降低了精细手术的可操作性。其他方案包括使用基于模型的力估计算法估计医生的手指握力和手术臂所受外力^[14]、使用观测器估计环境造成的外力^[15]、使用卡尔曼滤波估计手术外的环境力^[16]等,这些方法的优点是无需额外添加传感器,但没有考虑机械间隙、摩擦、张力等产生的不精确性。受种种因素的影响和限制,当前尚未形成触觉反馈的理想解决方案。事实上,机器人感知的难度远远大于通常的想象,精确感知未必总是可行的。

4.2 目标跟踪

受患者呼吸和手术操作等因素的影响,手术病灶(目标)会产生动态位移。这就要求手术机器人具备对位移的实时跟踪能力,以保障定位的精确性和手术的可靠性。早期方案采用机械固定方式建立机器人平台与患者的刚性连接^[17],具有较可靠的随动跟踪能力,但安装使用复杂,且对于患者侵入性较大。

近年来提出了基于光或磁的非接触式病灶跟踪技术。光学跟踪技术将呈特定几何形状的标记物点阵固定在患者身上,通过探测标记物发出/反射的红外光对其空间坐标进行定位和跟踪。该方案跟踪精度高、实时性好,被大多手术机器人所采用,如法国 Medtech 公司的 ROSA 机器人、国内天智航公司的天玑机器人、佻道医疗公司的佻手机器人等^[18-19]。由于光学跟踪技术要求标记物和光学相机之间不能有视线遮挡,为此探索了磁跟踪技术,但其定位精度低于光学跟踪,同时使用过程中会受到金属手术器械的干扰,从而对手术精度产生较大影响^[20]。其他目标跟踪技术包括:通过识别和提取病灶表面视觉图像特征进行跟踪^[21]、基于加速度计等惯性传感器的跟踪技术^[22]等,这些技术目前仍处在研究或实验阶段,尚无成熟的产品应用。

4.3 决策辅助

在医疗机器人的功能体系(图 1)中,决策主要是由人通过操作功能和规划功能实现的,比如操作功能可获取主刀医生的在线决策(即主手操作动作的决策),规划功能可获取医生或治疗师的离线决策(如预先制定的手术方案或康复练习动作序列)。另外,数据功能通过更好的信息处理,也可

表2 国内部分医疗机器人

分类	企业/技术背景	代表产品	
手术机器人	柏惠维康/北航	睿米神经外科手术机器人、口腔手术机器人	
	北京术锐	微创手术机器人	
	长木谷/哈弗、斯坦福	骨科手术机器人	
	哈工大机器人/哈工大	腹腔镜手术机器人	
	华尔康医疗科技(苏州)	腹腔镜手术机器人	
	上海微创医疗机器人公司	图迈Toumai腔镜手术机器人	
	华志微创	CAS-R-2微创手术机器人	
	华科精准	外科手术机器人	
	柳叶刀机器人	骨科手术机器人	
	键嘉机器人	智能骨科机器人	
	精锋医疗	智能外科机器人	
	罗伯医疗/哈工大	手术/康复/辅助诊断机器人	
	罗森博特	智能骨科手术机器人	
	三坛医疗	手术机器人“智慧天眼”	
	赛诺微/清华	微创外科手术机器人	
	思哲睿/哈工大	微创外科手术机器人	
	苏州康多	微创手术机器人	
	天智航/北航	天玑骨科手术机器人	
	威高集团/北航(骨科)/天津大学(微创)	妙手S微创手术机器人、玛特1骨科手术机器人	
	鑫君特	骨科手术机器人	
	佗道医疗	NS100骨科机器人	
	元化智能	骨科手术机器人	
	医疗辅助机器人	安翰科技/清华大学	主动式磁控胶囊胃镜
		金山科技/重庆大学	胶囊机器人
		佗道医疗	NP100穿刺手术机器人
		迈纳士	采血机器人
桑谷机器人		临床输液配药机器人	
达闼科技/华中科大		“医疗云脑”、“Dr.AI Phone智能医疗助手”	
科大讯飞		诊疗辅助机器人	
医千创		医学影像3D虚拟医疗导航机器人	
万物语联/北京科技大学		提供医学知识和看护服务的语联医生机器人	
若米医疗/东南大学		机器人云药房	
康复机器人	中科大	用于喂食的软件机器人	
	安阳神方/解放军信息工程学院	四肢康复机器人	
	大艾机器人/北航	外骨骼康复机器人	
	傅里叶智能/上海交大	外骨骼机器人	
	广州一康	MINATO、运动康复、物理治疗和康复评定	
	璟和机器人/上海交大	多体位智能康复机器人系统	
	六维康复	康复机器人	
	科远股份/东南大学	上肢康复外骨骼机器人	
	迈康信/哈工大	轮椅机器人	
	睿瀚医疗/西安交大	睿瀚I、II、III型手部康复机器人	
	迈步机器人	外骨骼机器人	
	中航创世机器人	医疗康复机器人	
	连信科技	心理服务机器人Psybot	
医院服务机器人	艾米机器人/浙大	医疗宣教服务机器人、物流机器人	
	楚天科技	机器人灭菌系统	
	礼宾/中科院	礼宾Le Pion医疗服务机器人	
	钛米机器人/上海交大	医院物流机器人	
	旗瀚科技/哈工大	健康服务平台机器人	
	楚天科技	机器人灭菌物流系统和机器人后包装生产线	

表3 国外部分医疗机器人

分类	公司名称	总部所在地	代表产品
手术机器人	Intuitive Surgical	美国	腹腔镜手术机器人Da Vinci外科手术机器人
	TransEnterix	美国	腹腔镜手术机器人Senhance
	Revo-I	韩国	腹腔镜手术机器人Severance
	Verb Surgical	美国	外科手术平台Digital Surgery Platform
	Stryker	美国	骨科手术机器人MAKO
	Medtronic	美国	骨科手术机器人Mazor X
	Zimmer Biomet	美国	骨科手术机器人ROSA ONE Spine、ROSA Knee
	Think Surgical	美国	骨科手术机器人TSolution One
	Renishaw	英国	神经外科手术机器人Neuromate
	Zimmer Biomet	美国	神经外科手术机器人ROSA ONE Brain
	Catheter Precision	美国	血管介入手术机器人Amigo
	Corindus	美国	血管介入手术机器人CorPath GRX
	Hansen Medical	美国	血管介入手术机器人Sensei Robotics
	Robocath	法国	血管介入手术机器人R-One
	Intuitive Surgical	美国	支气管手术机器人Ion
Auris Health	美国	支气管手术机器人Monarch	
医疗辅助机器人	NDR Medical	新加坡	穿刺导航机器人ANT-C、ANT-X
	Intouch Health	美国	远程提供卒中、心血管和烧伤的紧急咨询
	VGO Communications & Vecna Technologies	美国	视频通信解决方案
康复机器人	Rewalk Robotics	以色列	可穿戴外骨骼康复机器人
	Ekso Bionics	美国	骨骼康复医疗机器人
	Barrett Medical	美国	轻型灵活带反向力驱动机器人手臂WAM
	Rex Bionics Limited	英国	下肢外骨骼康复机器人
	Cyberdyne	日本	全球首款获得安全认证的外骨骼机器人
	Luvozo PBC	美国	提高老年人和残疾人生活质量的陪伴机器人
	Honda Robotics	日本	协助老人或卧病在床或轮椅的人料理生活
	Woebot Health	美国	心理治疗机器人Woebot
	Wysa	印度	情绪健康聊天机器人
	MIT	美国	个性化儿童自闭症康复机器人
	LuxAI	卢森堡	自闭症治疗机器人Qtrobot
医院服务机器人	RoboKind	美国	Milo自闭症治疗机器人
	Aethon	美国	可携带行李架、手推车、453公斤药物、标本或其他敏感材料的物流配送机器人TUG
	Innovation Associates	美国	药房自动化设备
	Omniceil & Aesynt	德国	药房自动化设备

以对决策提供更好的辅助。

上述三方面的决策辅助可以更好地支持医疗机器人的人工决策，一定程度上提高机器人的工作效率并减少人工干预。例如在骨科手术领域，Medtronic公司提出了基于解剖参数测量的侧弯智能分型技术，目前已应用于Mazor X机器人；佗道医疗等提出了骨科机器人基于锥节分割和迁移训练的钉道自动规划技术，在实验室验证中达到了良好的准确率。在腹腔镜手术领域，提出了病灶图像的分割与跟踪技术，用于病灶的精准定位与切割^[23]。霍普金斯大学

据此技术研制的手术机器人，能够通过病灶图像跟踪与手术任务规划，在活体上自动完成了肠道吻合手术^[24]。在胸腹外科领域，基于影像组学和深度学习的病灶识别与分割技术，在结节早期筛查等方面得到了良好应用^[25]。箴石医疗、佗道医疗等公司将此技术应用于机器人穿刺导航，但受患者个体差异等因素的制约，目前尚未用于临床。

4.4 改善自主性

某些种类的机器人手术已经得到大规模应用，如在英国每年有超过6 000例前列腺切除术(RALPs)

是用腹腔镜机器人做的。这些手术的效果在很大程度上受到操作人员(主刀医生和助手)的实际技能和经验的影响^[26]。为了克服手术效果对操作者差异的依赖性,改善治疗效果,缩小区域间的医疗差距,产生了改善医疗机器人自主性的要求。关于医疗机器人的自主性程度,一种分级方法建议^[27]划分为以下5级:1级:机器人辅助(例如达芬奇机器人);2级:任务自主(例如前列腺近距离放射治疗);3级:条件自主(例如AquaBeam机器人);4级:高度自主(如在合格医生的监督下由机器人做决定);5级:完全自主(比如由机器人完全独立地完成整个手术)。除了第5级,其他4级都是半自主性。按此标准,目前手术机器人和大部分医疗机器人最高只达到了3级自主性。

医疗机器人的自主性受到了诸多技术限制,例如患者的差异、复杂的图像识别、运动的精确控制、复杂的治疗决策以及相关的伦理法律约束等等。对于提升自主性的一种普遍性期待来自人工智能的快速发展;然而分析表明^[28],以强力法和训练法为代表的现有人工智能技术不适合于非封闭性问题的自主性解决,而医疗中的很多重要应用(特别是外科手术)是非封闭的(即存在未知变元或不可解变元),并且应用中出现的失误往往是致命性的。因此,对于这些医疗机器人而言,改善自主性的主要目标不是彻底消除人的干预,而是改善对人的辅助,以尽可能降低医疗效果对操作者差异的依赖程度。这将涉及五种基本功能的易用性、稳定性和可能情况下更加稳健的半自主性。

上述分析表明,医疗机器人是一种人机混合系统,人在其中具有不可替代的作用,所以不能将医疗机器人简单地定义为软硬件装置,而应通过功能体系进行整体把握。

4.5 其他课题

医疗机器人还面临着其他技术挑战,并与相关学科的发展存在着广泛的交叉和相互促进。远程手术是一个受到长期关注的课题^[29-31],与5G通讯、VR/AR、遥操作等技术的发展具有十分密切的关系。软体机器人是机器人领域的一个新方向,近年来在康复机器人(尤其功能辅助)和手术机器人应用中的巨大潜力引起了高度重视^[32-34]。中国科学技术大学将自主研发的软体机器人^[35]应用于高位截瘫、渐冻症等失能者的喂食,具有比刚性机器人更高的安全性和灵活性。机器人尤其医疗机器人的安全性也是一个重要的新课题,利用刚柔混合机构提高机

器人的柔顺性是增强安全性的一条重要途径^[36]。另一个新方向微纳机器人^[37-38]正在为精准医疗开辟一条新路径,在药物靶向运输、生物传感和细胞修复中具有良好应用前景。另外,借助于脑机接口,患者可以更方便、更高效地控制康复机器人的动作,从而显著提高康复机器人的康复治疗和功能替代的效果^[39-41]。以上各个方向是相关的,如柔性机器人技术与脑机接口技术的结合有利于提高康复机器人的性能^[42]。

致谢:感谢张英梅、阮梅花、陈荣亚、庄庆昊、程敏、王锋、杨小鲁为本文写作提供的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 赵新刚,段星光,王启宁,等. 医疗机器人技术研究展望. 机器人, 2021, 43: 385
- [2] 倪自强,王田苗,刘达. 医疗机器人技术发展综述. 机械工程学报, 2015, 51: 45-52
- [3] 杜志江,孙立宁,富历新. 医疗机器人发展概况综述. 机器人, 2003, 25: 182-7
- [4] 张付祥,付宜利,王树国. 康复机器人研究进展. 河北工业科技, 2005, 22: 6
- [5] 布鲁诺·西西利亚诺,欧沙玛·哈提卜. 机器人手册(第三卷)[M]. 北京:机械工业出版社, 2016
- [6] WHO. Rehabilitation [EB/OL]. (2021-11-10). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>
- [7] 张飞,喻洪流,王露露,等. 康复机器人的分类探讨. 中华物理医学与康复杂志, 2017, 39: 633-6
- [8] 王田苗,田增民. 立体定向脑外科机器人集成系统研究. 世界医疗器械, 1997, 3: 30-5
- [9] Bargar WL, Bauer A, Börner M. Primary and revision total hip replacement using the Robodoc system. Clin Orthop Relat Res, 1998, 354: 82-91
- [10] Wang YF, Uecker DR, Wang Y. A new framework for vision enabled and robotically-assisted minimally invasive surgery. Comput Med Imaging Graph, 1998, 22: 429-37
- [11] Li H, Song A. Force assistant master-slave telerehabilitation robotic system. J South Uni (Eng Ed), 2008, 24: 42-5
- [12] Wagner C, Stylopoulos N, Howe RD. The role of force feedback in surgery: analysis of blunt dissection [C]. Symp Haptic Interfaces Virtual Environ Teleoperator Syst, 2002: 68-74
- [13] Kamikawa Y, Enayati N, Okamura AM. Magnified force sensory substitution for telemanipulation via force-controlled skin deformation [C]. Proc IEEE Int Conf Robot Autom, 2018: 4142-8
- [14] Zhao B. A sensorless haptic interface for robotic minimally invasive surgery [D]. Nebraska: University of Nebraska, 2015
- [15] Hacksel PJ, Salcudean SE. Estimation of environment forces and rigid-body velocities using observers [C]. Proc IEEE Int Conf Robot Autom, 1994: 931-6
- [16] Hu J, Xiong R. Contact force estimation for robot

- manipulator using semiparametric model and disturbance Kalman filter. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 65: 3365-75
- [17] Lieberman IH, Hardenbrook MA, Wang JC, et al. Assessment of pedicle screw placement accuracy, procedure time, and radiation exposure using a miniature robotic guidance system. *J Spinal Disord Tech*, 2012, 25: 241-8
- [18] Lefranc M, Peltier J. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures. *Exp Rev Med Dev*, 2016, 13: 899-906
- [19] Han X, Tian W, Liu Y, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: a prospective randomized controlled trial. *J Neurosurg Spine*, 2019, 8: 1-8
- [20] Meskers CG, Fraterman H, Van Der Helm FC, et al. Calibration of the “Flock of Birds” electromagnetic tracking device and its application in shoulder motion studies. *J Biomech*, 1999, 32: 629-33
- [21] Clarke JV, Deakin AH, Nicol AC, et al. Measuring the positional accuracy of computer assisted surgical tracking systems. *Computer Aided Surg*, 2010, 15: 13-8
- [22] Pflug S, Liu L, Ecker TM, et al. A cost-effective surgical navigation solution for periacetabular osteotomy (PAO) surgery. *Int J Computer Assist Radiol Surg*, 2016, 11: 271-80
- [23] Kobayashi Y, Kawaguchi Y, Kobayashi K, et al. Portal vein territory identification using indocyanine green fluorescence imaging: technical details and short-term outcomes. *J Surg Oncol*, 2017, 116: 921-31
- [24] De Momi E, Segato A. Autonomous robotic surgery makes light work of anastomosis. *Sci Robot*, 2022, 7: eabn6522
- [25] Kozuka T, Matsukubo Y, Kadoba T, et al. Efficiency of a computer aided diagnosis (CAD) system with deep learning in detection of pulmonary nodules on 1-mm-thick images of computed tomography. *Jpn J Radiol*, 2020, 38: 1052-61
- [26] Khadhoury S, Miller C, Fowler S, et al. The British Association of Urological Surgeons (BAUS) radical prostatectomy audit 2014/2015 - an update on current practice and outcomes by centre and surgeon case-volume. *BJU Int*, 2018, 121: 886-92
- [27] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics - regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Sci Robot*, 2017, 2: eaam8638
- [28] 陈小平. 人工智能中的封闭性和强封闭性——现有成果的能力边界、应用条件和伦理风险. *智能系统学报*, 2020, 15: 114-20
- [29] 刘荣, 吕文平. 远程机器人手术的未来趋势: 跨时空外科手术. *中华腔镜外科杂志(电子版)*, 2021, 14: 257-9
- [30] 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. *机器人技术与应用*, 2020, (02): 15-8
- [31] 徐武夷, 杨文, 卢旺盛. 机器人远程手术研究状况与展望. *转化医学杂志*, 2015, 4: 94-7
- [32] Nguyen PH, Sparks C, Nuthi SG, et al. Soft poly-limbs: toward a new paradigm of mobile manipulation for daily living tasks. *Soft Robot*, 2019, 6: 38-53
- [33] Polygerinos P, Wang Z, Galloway KC, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robot Auton Syst*, 2015, 73: 135-43
- [34] Lee G, Kim J, Panizzolo FA, et al. Reducing the metabolic cost of running with a tethered soft exosuit. *Sci Robot*, 2017, 2: eaan6708
- [35] Jiang H, Wang Z, Jin Y, et al. Hierarchical control of soft manipulators towards unstructured interactions. *Int J Robot Res*, 2021, 40: 411-34
- [36] 赵京, 张自强, 郑强, 等. 机器人安全性研究现状及发展趋势. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44: 1347-58
- [37] 杨佳, 张闯, 王晓东, 等. 微纳机器人的发展综述. *Sci Sin Technol*, 2019, 49: 119-20
- [38] Li H, Liu W, Wang J, et al. Nanoconfined atomic layer deposition of TiO₂/Pt nanotubes: toward ultrasmall highly efficient catalytic nanorockets. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1700598
- [39] 蒋勤, 张毅, 谢志荣. 脑机接口在康复医疗领域的应用研究综述. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2021, 33: 562-70
- [40] 常琪, 单新颖, 毕胜. 基于脑电图的脑机接口在肢体康复中的应用进展. *中国康复医学杂志*, 2019, 34: 1488-92
- [41] 琚芬, 赵晨光, 袁华, 等. 脑机接口在康复医学中的应用进展. *中国康复*, 2017, 32: 508-11
- [42] 荆泓玮, 朱延河, 赵思恺, 等. 外肢体机器人研究现状及发展趋势. *机械工程学报*, 2020, 56: 15-23