



# 外科手术协作机器人 发展现状和未来方向

刘春华

**摘要:**手术协作机器人被逐步应用于神经外科、心脏外科、泌尿外科及骨科等手术作业中,已显示出良好的社会和经济价值。人工智能技术的突破性发展,更是能够为协作机器人带来革命性的变革。国家对手术协作机器人产业给予了支持和重视,发展医用手术机器人被写入了《中国制造 2025》中。为促进我国外科协作机器人技术的研究和发展,文章介绍了外科手术协作机器人的主要结构和国内外发展现状,并且结合当前的机器人技术,概述了未来外科手术协作机器人的主要发展方向。

**关键词:**手术协作机器人;人工智能;发展方向

近年来,随着人工智能的发展,有着“大脑”的智能协作机器人成为热门的研究方向之一。尤其是 2023 年以来,以 ChatGPT 为代表的大语言模型突破性发展,更加靠近人类智力的生成式人工智能(AIGC)将在未来几年出现爆发式增长。AIGC 应用于协作机器人是时代所趋,而高度智能化和专业化的协作机器人非常符合人们对未来工作生活的憧憬。

在医疗领域,手术协作机器人(Collaborative Robots)已被广泛应用于各大医院的手术室中,其通过结合机器人技术和图像导航等先进技术,可以提供更高的手术精确度,实现更小的创伤和更快的康复速度,在近几年里成为医疗领域中的一颗新星。例如,骨科手术协作机器人是一类发展较为成熟的医用电气设备系统,在我国一些大型医院进行的髋关节、膝关节等手术中协助主刀医生进行手术作业,使得患者的手术过程更加便捷和安全。

## 外科手术协作机器人主要结构概述

2016 年 2 月,国际标准化组织针对协作机器

人发布了工业标准,其中对“协作”进行了定义:“一个特定设计的机器人系统与操作者在同一工作环境下协同工作的状态”<sup>[1]</sup>。该标准明确了协作机器人的安全设计准则。符合标准的协作机器人将足够安全,不再需要防护栏进行隔离。因此,外科手术用的协作机器人并非是能够自主完成手术作业的全智能机器人,而是辅助医生进行手术作业的机器人,可与手术医生近距离合作,大大提高手术效率和手术安全性。

从硬件结构组成看,外科手术协作机器人主要包括机器人本体、中空力矩电机、谐波减速机、伺服驱动器及控制器等部分。从功能组成看,主要可分为机械臂系统、信息采集与处理系统、控制系统和医生操作界面系统等。从设计上来说,其系统构架一般遵循建模、规划和执行 3 个原则<sup>[2]</sup>。建模阶段完成对患者手术信息的采集、处理和分析;规划阶段通过整合综合信息,进行分析研判,确定手术方案;执行阶段是通过其自动化机械臂辅助医生实现手术方案。3 个阶段相辅相成,在计算机高速计算中瞬时完成。

## 国内外发展现状

### 1. 国外发展现状

协作机器人的概念最早于 20 世纪 90 年代在美国被提出,经过多年的发展,外科手术协作机器人在国外市场上得到了广泛应用。如美国直觉外科公司(Intuitive Surgical)的达芬奇机器人、美敦力(Medtronic)的 Hugo RAS 腹腔镜手术机器人、史赛克(Stryker)的 MAKO 机器人。这些手术协作机器人系统已经在许多医疗场景中得到应用,包括心脏和血管手术、胸腔外科手术、泌尿外科手术、妇产科手术、骨科手术等,并取得了良好的临床效果。



一方面,由于发展得早,技术基础更加深厚,发达国家在手术协作机器人领域已经形成了较为完善的研发和应用技术内循环。更多的研发投入,能够出现更广泛的应用和更多的创新。国外最近的研究还探索了自适应外科手术协作机器人的概念。这种协作机器人系统可以根据实时手术情况和医生的操作,自动调整和优化手术方案和操作策略<sup>9</sup>。并且它能够根据不同患者的创口特征和手术需求,提供个性化的手术支持。这种技术就是先进人工智能和高性能硬件的深度结合。例如,美国直觉外科公司开发的达芬奇机器人微创外科手术系统是目前世界范围应用最广泛的一种智能化手术平台,应用在普腹外科、泌尿外科、心血管外科、胸心外科、妇科、五官科、小儿外科等遥控微创手术中<sup>10</sup>。该系统的手术操作部分已完成7个自由度的操作,由外科医师在远程工作站进行遥控,具有整合三维成像、触觉反馈和宽带远距离控制等功能。

另一方面,发达国家几乎垄断着协作机器人的核心零部件。一台高性能的协作机器人缺失不了最核心的零部件,比如中空伺服电机、谐波减速器、模块化编码器、伺服驱动器及高性能传感器等。例如,电机是协作机器人的动力来源,传统的伺服电机无法用于机械臂中,只能采用中空伺服电机进行内部走线。中空伺服电机具有中空的轴心孔,可以通过轴心孔传递气体、液体、光纤等信号或物质。它结合了传统伺服电机的动力驱动功能和中空轴的特殊设计。美国的科尔摩根(Kollmorgen)、日本的安川电机、德国的西门子等企业几乎垄断了高端中空伺服电机市场。再如,被广泛用于高端手术协作机器人的一种软性传感器,它可以弯曲和变形,在人体腔腹内灵活变动,减小对人体的创伤。2023年5月,美国斯坦福大学最新开发了一种名为“电子皮肤(electronic skin)”的柔性传感器技术,可以实现高灵敏度的触摸感知和形变测量<sup>11</sup>。而当前能够商业化生产高性能柔性传感器的只有美国、德国等少数国家。

## 2.国内发展现状

手术协作机器人的开发涉及整个工业体系的

进步和发展,我国整体起步较晚,尚未在医疗机构中大规模普及应用。目前,虽然欧美等发达国家和地区控制着手术协作机器人的主要生产和专利技术,但我国经过这几年的投入,国内手术协作机器人产业已经取得了快速的发展。

2019年,中国科学院沈阳自动化研究所与北京大学人民医院合作成功完成了“智行者”手术机器人在心脏手术中的应用。这是国内手术机器人在心脏外科领域的重要进展,为手术机器人在更多领域的应用提供了经验和参考。次年,中国科学院沈阳自动化研究所发布了第三代手术机器人系统——“智行者Ⅲ”手术机器人。该系统在机器人结构、操作控制和感知技术等方面进行了改进和优化,进一步提升了手术机器人的性能和可靠性。国内企业中,中科创星科技投资有限公司、大博医疗科技股份有限公司(简称大博医疗)、深圳市精峰医疗科技股份有限公司(简称精峰医疗)等公司也各自推出了自主研发的手术协作机器人系统,并在一些医疗机构取得了不错的临床效果。这些公司在机器人硬件、操作系统和感知技术等方面进行了大量的技术创新。例如,大博医疗研发的膝关节手术机器人系统,已经在临床试验中取得了专家医生的高度认可。精峰医疗2023年研发的单孔手术机器人系统,令医生利用5G网络完成了远程鸡蛋剥壳、鸡蛋膜缝合试验,这已经代表了该领域最前沿的技术<sup>12</sup>。

当前国内手术协作机器人产业发展仍面临很大的挑战,包括精密零部件开发、技术创新、标准制定、临床验证及市场推广等方面的问题。然而,随着技术的不断进步和市场需求的增长,预计未来几年国内手术协作机器人产业将迎来更多的机遇和发展空间。

## 未来发展方向

### 1.智能化方向

人工智能技术的突破式发展,尤其以大语言模型为基础的生成式人工智能的出现在科技圈掀起了一轮激烈竞争。我国在人工智能领域的技术是走在前沿的。在此背景下,进行更专业化的医学语言知识训练,建立医疗垂直领域的大语言模型



## 知识长廊

也成了医疗行业热门的研究方向之一。通过深度卷积神经网络等技术,手术机器人可以学习和识别复杂的视觉模式,如人体伤口、手术器具和场景等,同时结合病人各项实时生理指标等数据,根据手术协作机器人深度学习到的医学知识,进行临床判断和操作。这使得手术机器人能够更好地与专业医生进行交互,并执行更复杂的手术任务<sup>[7]</sup>。甚至在可预想的将来,手术协作机器人成为独立的智能手术机器人,其手术作业可以完全脱离人工的干预,完成高精度的手术任务,最终使得其成为集大成的外科手术专家。

另外,5G技术的发展也为手术协作机器人智能化带来了新机遇。5G网络的高速和低延迟使得远程操控手术协作机器人变得更加便捷,从而提高诊断和治疗的效率。

### 2. 传感技术方向

传感技术在智能机器人应用中是最为关键的技术之一,是智能机器人感知外部信息的窗口。因此,传感技术的优劣决定着智能机器人对外部信息判断的准确度。在医用外科手术协作机器人领域,更加专业化、精准化的视觉传感是核心技术之一。

视觉传感技术在近些年得到了巨大的进步。在目标识别、姿态估计、场景理解等方面取得了重大突破。同时,超高分辨率的摄像头和图像处理算法使得手术机器人能够实时感知和理解周围的环境。一方面,跨模态感知技术是手术协作机器人重要的发展方向。例如,利用手术中的触觉、力量等传感器来感知手术场景,并将其感知到的信息整合在一起,进行决策和行动。另一方面,柔性传感技术也得到快速发展,被逐步用于手术协作机器人的感知技术中。其主要利用柔性材料和触觉传感器来实现机器人的触觉感知。这种技术使得手术协作机器人能够更加精确感知和处理手术中人体创口的形状、骨骼的硬度、体温等信息,从而实现更精细的操作和交互。

### 3. 精密机械臂

机械臂是外科手术协作机器人最重要的核心硬件,一个高性能的机械臂,决定着整套系统的实

用性和安全性。机械手臂在人类发展历史上可以追溯到几个世纪以前,经过一代代无数人的努力,现代工业机器人机械臂技术已经较为成熟,但是从其机械精密度和稳定性方面,相关技术还是被欧美等发达国家和地区垄断,尤其7轴以上的机械臂,我国相关生产技术与发达国家还有一定的差距。

就精密机械臂方面,未来有如下几个发展方向:一是刚性和轻量化设计。为了减小机械臂自身的振动和形变,通常需要采用刚性材料进行结构设计,但是,为了降低机械臂的质量和惯性,也需要对其进行轻量化设计。如采用高强度的复合材料和空心结构等技术,可以让机械臂保持刚性的同时减轻自身质量,提高其动态响应和精度。二是多关节和灵活性设计。多关节设计使得机械臂可以在多个自由度上进行灵活的运动。增加关节数目,机械臂可以实现更复杂更精细的操作,同时机械复杂程度也大大增加<sup>[8]</sup>。此外,利用柔性材料进行机械臂设计也是当前的一个研究热点,其可以在运动中实现更大的变形能力和适应性,在更复杂的作业环境中进行灵活操作。三是自适应高精度控制。为了让机械臂实现更高的自适应控制精度,就需要更精密的传感器和自适应控制算法。例如,在骨科协作机器人作业中,采用光学编码器、激光测距仪等来实时监测机械臂的运动轨迹和力量控制,同时配合相应的自适应控制算法来实现精确的骨骼切割等作业。

### 4. 控制系统及相关软件方向

外科手术协作机器人系统不仅要拥有高性能的机器臂,还要具备一套与之相对应的软硬件系统,包括机器人调试、运行控制、术中信息记录、参数分析与判断等应用。例如,髋关节手术协作机器人在作业中不仅需要视觉、激光雷达、惯性测量单元等传感器的数据进行融合,同时还需要结合病人髋关节手术部位的生理特征数据进行综合判断,给出最佳的手术辅助建议。未来手术协作机器人系统将整合更多的软硬件元素,并集成到一体,为更加复杂的外科手术提供更加便捷、安全的操作体验。