

• 理论研讨 •

面向临床需求的医疗机器人研发模式与原则

钟威¹ 闫有圣¹ 阴赓宏²¹首都医科大学附属北京妇产医院/北京妇幼保健院医学遗传科,北京 100026;²首都医科大学附属北京妇产医院/北京妇幼保健院中心实验室,北京 100010

通信作者:阴赓宏,Email:yinchh@ccmu.edu.cn,电话:010-52276699

【摘要】 目的 面向临床需求,系统梳理医疗机器人研发模式与原则,明确不同模式与临床场景的适配逻辑,为该领域的科研管理、政策制定及产业实践提供参考依据。**方法** 从组织协同方式、技术驱动核心两个维度,对现有医疗机器人研发模式进行阐述,深入解析各类模式的特征,并结合不同国家的实践特点,及手术、康复、诊断与辅助服务等不同类型医疗机器人的临床需求差异,深入解析各类研发模式的适配性及应用条件。**结果** 医疗机器人的研发模式,基于组织协同方式分类,可以划分为“医工企”协同研发模式、高校或者科研院所主导模式及企业主导研发模式;基于技术驱动核心分类,可分为传统机电一体化驱动模式和人工智能与数据驱动模式。不同分类的医疗机器人具有不同的研发原则,研发模式与应用场景匹配框架应是动态的闭环系统,可概括为“需求洞察→模式选择→资源整合→场景验证→迭代优化”。**结论** 在医疗机器人研发模式中,不同模式各有优势与局限性,应当结合机器人的类型、技术阶段和资源政策等具体场景灵活选择。研发中不仅需要注重研发模式与临床需求的适配,在目前,也需重视新一代人工智能——多模态大语言模型在医疗机器人中应用的研发策略。

【关键词】 医疗机器人; 研发模式; 医工企协同; 产学研医

基金项目:北京学者计划

【中图分类号】 R19;R-05 **【文献标识码】** A DOI:10.3760/cma.j.cn113565-20251229-00370

Development patterns and principles of medical robots oriented to clinical needs

Zhong Wei¹, Yan Yousheng¹, Yin Chenghong²¹Department of Medical Genetics, Beijing Obstetrics and Gynecology Hospital, Capital Medical University/Beijing Maternal and Child Health Care Hospital, Beijing 100026, China; ²Department of Central Laboratory, Beijing Obstetrics and Gynecology Hospital, Capital Medical University/Beijing Maternal and Child Health Care Hospital, Beijing 100010, China

Corresponding author: Yin Chenghong, Email:yinchh@ccmu.edu.cn, Tel:0086-10-52276699

【Abstract】 Objective Object To systematically map out the R&D models and principles of medical robots from a clinical-needs perspective, clarify the matching logic between different models and clinical scenarios, and provide evidence for research management, policy-making and industrial practice. **Methods** From two dimensions—organizational collaboration mode and core technology driver, we described existing medical-robot R&D models, analyzed their characteristics in depth, and combined national practice features with the differing clinical demands of surgical, rehabilitation, diagnostic and assistive robots to dissect the adaptability and application conditions of each model. **Results** In terms of R&D models for medical robots, those based on organizational collaboration can be classified into the "medicine-engineering-industry" collaborative model, the university- or research-institute-led model, and the enterprise-led model. When categorized by the core technology driver, they fall into the traditional electromechanical-integration model and the AI- and data-driven model. Robots in each category follow distinct R&D principles; the matching framework between R&D model and application scenario should therefore be a dynamic closed-loop system that can be summarized as "needs insight → model selection → resource integration → scenario validation → iterative optimization". **Conclusions** In the R & D mode of medical robot, different modes have their own advantages and limitations, which should be flexibly selected according to the specific scenarios such as robot type, technical stage and resource policy. In R & D, we not only need to pay attention to the adaptation of R & D mode and clinical needs, but also pay attention to the R & D strategy of the application of a new generation of artificial intelligence-multimodal large language model in medical robots.

【Key words】 Medical robots; Development patterns; Medical-engineering-enterprise collaboration; Industry-university-research-medical

Fund program: Beijing Scholars Program

DOI:10.3760/cma.j.cn113565-20251229-00370

医疗机器人是旨在作为医疗电气设备或医疗电气系统使用的机器人^[1]。它们融合了临床医学、生物

力学、计算机科学等多学科领域的技术,其核心目标是辅助甚至替代特定医疗场景中的诊疗等任务^[2-3]。

目前,常见的医疗机器人有:微创手术中的“达芬奇”系统、康复外骨骼机器人以及负责物流和消毒的服务机器人。可见,医疗机器人已深度渗透到当今医疗服务的各个环节,以提升诊疗精度以及降低操作风险。此外,医疗机器人在缓解人力短缺和优化资源配置等方面也作用显著^[4]。近年来,由于市场需求和政策扶持,我国的医疗机器人产业得以快速增长。据公开资料显示^[5],2024 年,我国医疗机器人市场规模约为 135.8 亿元,近 5 年年均复合增长率达 22.96%;在 2018—2022 年间注册备案数量从 8 个起上升至 27 个。同期,相关企业注册量也持续攀升^[6],在 2024 年新增医疗机器人企业到达 4.40 万个。

然而,研发医疗机器人的过程往往需要多方参与,是一个复杂的系统工程。构建科学的研发模式将有助于整合创新资源并加速成果转化。本文面向临床实际需求,梳理分析主流研发模式在各类医疗机器人中的适配性,旨在该领域的管理者优化资源配置,政策制定者完善行业监管及一线从业者明确研发方向,提供理论依据与路径参考。

1 资料来源与方法

1.1 资料来源

本文资料涉及学术文献、政策文本及产业资料。我们在中国知网、万方数据、PubMed 中检索近 10 年的参考文献,关键词为“医疗机器人(Medical Robot)”和“研发模式(R&D Mode)”等,人工筛选涉及研发组织形式与转化路径的研究。此外,我们从互联网收集并分析了主要医疗机器人国家的战略规划文件,包括我国《“十四五”机器人产业发展规划》、美国国家科学基金会资助项目指南、日本《新机器人战略》及德国“高技术战略 2025”等,以及医疗机器人研发相关的统计数据。本文还选取行业内具有代表性的企业作为案例对象,收集其相关文献资料,以作为微观层面的分析证据。

1.2 研究方法

本文主要采用定性内容分析法与比较案例研究方法。首先,基于内容分析法,对收集的资料进行梳理,归纳出当前主流的研发模式。其次,对比分析不同模式在资源整合、风险控制及成果转化效率上的差异,并结合手术、康复及辅助服务等不同临床场景的需求特点,构建“研发模式—临床需求”的适配逻辑框架。

2 医疗机器人研发模式

医疗机器人的研发模式是围绕不同目标、资源及约束条件形成的多元化范式。对其进行系统分

类,可为临床需求与研发实践搭建精准对接的桥梁。厘清不同模式的核心特征,可帮助研发主体精准锚定研发路径,为医疗机器人从技术构想向临床实践的高效落地提供系统性指引。目前,国内外尚无统一的分类标准,本文从以下两个维度对医疗机器人研发模式进行系统性划分。

2.1 基于组织协同方式的分类

医疗机器人研发具有典型的多学科交叉特征,需医学、工程学和计算机科学等领域专家深度协作,而不同的组织协同方式催生了多样化的研发模式。

2.1.1 “医工企”协同研发模式 这是当前我国最为推崇且实践证明极为成功的模式,政府及行业协会一般也鼓励此模式,旨在加快科技成果转化。该模式由医疗机构、高校/科研院所和企业三方构成一个紧密的创新生态系统。从资源整合角度来看,也可称为“产学研医”协同创新模式,即是一种整合产业界、学术界、科研机构和医疗机构四方资源,形成优势互补、风险共担、利益共享的开放式创新生态系统。医院提出临床需求,并提供试验验证场景;高校/科研院所具备科研优势,可负责核心技术的攻关与样机开发;企业发挥市场优势,主导产品的工程化、注册申报、市场推广和产业化。然而,在实际合作中,部分技术实力雄厚的企业可以独立完成研发环节,形成医院和企业双方合作的简化模式。我国“天智航骨科手术导航定位系统”的研发过程是“医工企”协同的典型范例^[7]:北京积水潭医院以骨科临床需求为导向,对机器人临床改进方向提出建议;工科院校北京航空航天大学基于高校优势开发了骨科双平面定位技术;而合作企业北京天智航医疗科技股份有限公司以委托研发和购买的方式获得了骨科双平面定位技术的所有权和使用权,并在此基础上不断研发迭代,先后完成了三代骨科手术导航定位系统的研制和产业化工作。我国类似研发模式的医疗机器人还有“微创图迈腹腔镜手术机器人”^[8]和“傅利叶 Fourier X1 上肢机器人”等^[9]。

这模式能够有效打通从临床痛点到技术解决方案,再到市场产品的全链条,从而实现临床需求和市场化导向的统一。通过早期的介入和融合,不仅可以临床需求转化为产品设计指标,在未来,科研成果也可和产业化流程实现无缝对接。因此,“医工企”协同研发模式在顺利的情况下能缩短研发周期,并提高产品转化成功率^[10]。然而,多方利益协调与流程管理仍是该模式下的突出难题。从各参与方的核

心目标而言,医院主要关注临床疗效与安全性;高校或者科研院所,追求的是学术成果与知识产权;企业作为营业机构,则更加强调市场收益。因此,这种目标理念的差异可能导致多方在合作过程中产生分歧。

2.1.2 高校或者科研院所主导模式 该模式也可称为“学术驱动模式”,是以高校或科研院所独立或主导,以探索前沿科学、突破关键技术为主要目标的模式。一般来说,由于高校或科研院所聚集了丰富的专家学术资源,创新能力较强,因此是“从 0 到 1”原始创新的主要策源地。例如,微纳机器人、软体机器人和脑机接口等,这些变革性的产品及其理论均起源于国外高校实验室。我国高校也在该领域贡献了自身力量,例如,中国科学技术大学近期设计的上肢康复机器人^[11];浙江大学在 COVID-19 疫情期间,专门研发的用于抗击疫情的医疗辅助机器人^[12]等,这都是学术驱动模式下的成功案例。然而,高校或科研院所研发早期,多依赖于国家自然科学基金等政府科研项目的支持,因此需要政府的资金投入。此外,研发人员一般为专职科研人员,也通常缺乏将技术成果商业化的经验和资源,其研究成果多以原型机或学术论文的形式存在,距离商业化仍有较大距离。尽管如此,这种主导模式在商业化进程中仍不可替代,其探索经验可为后续商业化奠定了重要的理论基础。

2.1.3 企业主导研发模式 在该模式下,企业凭借雄厚资本、强大的工程团队及成熟市场渠道,独立或主导整个研发过程。在国际市场,美敦力、强生等巨头通过内部研发与并购的模式主导行业^[13];国内,微创医疗等

企业也通过此模式构建机器人产品矩阵^[14]。

具体来说,企业主导的研发模式紧密围绕临床痛点,往往产品定位明确,具有清晰的商业化路径,能快速响应市场变化。此外,大型医疗器械公司拥有雄厚的资本实力,能够长期、大规模地进行研发投入和市场推广。企业由于自身特性,在产品设计、生产制造及市场营销方面等方面拥有成熟体系,能有效推动产品从样品到商品的转化。除内部研发外,大型企业常通过购初创公司等方式,快速获取关键技术以缩短研发周期。例如,西门子医疗在 2019 年以 11 亿美元收购了 Corindus,从而获得了其血管介入机器人系统,省去了自研系统所需的时间和漫长的注册审批流程^[15]。

美国直觉外科公司是企业主导模式的典范。其凭借“达芬奇”系列产品长期垄断手术机器人市场,具有强大的自主研发能力^[16];截至 2022 年 3 月,该公司市值为 987.3 亿美元,获 7 015 项专利。在 2024 年美国直觉外科公司占据全球手术机器人市场近 60% 的份额。公司通过持续的内部研发,不断推出新一代产品和配套器械,已经构建了强大的专利壁垒。

2.1.4 三种研发模式的对比分析 为进一步明确不同研发模式的特征差异,以便为实际研发提供决策参考,本文从研发周期、资金来源、转化效率、风险水平及适用场景 5 个维度,对上述 3 种模式进行了系统对比(表 1)。需要强调的是,在实际研发中,由于影响因素很多,各种研发模式的特征可能会相应变化,本文仅阐述其基本特征。

表 1 三种主要医疗机器人研发模式的特征对比表

特征	医工企协同	高校/科研院所主导	企业主导
主导方	医院提出需求,高校攻克技术,企业工程化	高校或科研院所	医疗器械企业
研发周期	中等(需多方磨合,但后期取证快)	长(侧重基础原理验证,距离产品化远,存在“死亡之谷”风险)	短(目标明确,或通过并购加速)
资金来源	多元混合(政府专项+企业配套+医院自筹)	政府资助为主(如国家自然科学基金)	市场资本为主
成果转化效率	高(临床需求前置,少走弯路)	低(缺乏工程化经验)	极高(直接面向市场,供应链成熟)
风险水平	中(多方分担风险,但协调难度大)	高(技术路线不确定性大,商业化前景不明)	低(基于成熟技术或市场验证)
典型适用场景	高风险、高技术壁垒创新产品。如骨科手术机器人、腔镜机器人等	从 0 到 1 的前沿探索,如微纳机器人、脑机接口等	低风险或迭代型产品。如康复辅助、医院物流机器人等
核心优势	打通“医工企”闭环,产品临床贴合度高	原始创新策源地	市场响应速度快,规模化生产与商业推广能力强

2.2 基于技术驱动核心的分类

技术的演进是驱动研发模式变革的根本动力^[17]。从技术范式的角度,可将研发模式分为传统机电一体化驱动模式,及人工智能与数据驱动模式。

2.2.1 传统机电一体化驱动 该模式为传统模式,研发核心是机械结构设计、精密传动与伺服控制。其目标是打造一个精准稳定,且可靠的“机械臂”或“机电系统”。早期机器人多遵循此模式,但其已逐步被更具适应性的智能新模式替代^[18]。其核心局限在于:仅能被动执行,缺乏对复杂医疗场景的主动感知与决策能力。因此,难以应对临床上个体差异明显和病情动态变化。

2.2.2 人工智能与数据驱动 这种模式是目前主流的研发模式。如今,医疗机器人研发的核心不仅是特定医疗场景的执行,更包含了自动识别等智能化特征。此模式下,通过应用深度学习等人工智能技术,机器人能够自主理解复杂的医疗场景及分析海量数据。此外,大语言模型的出现与发展,有望实现在医疗机器人领域使用自然语言进行人机交互,从而进一步提升智能水平^[19]。在需求分析阶段,该模式即引入数据建模的过程。例如,我院正在研发的羊膜腔手术辅助穿刺机器人,初期需要使用大量羊膜腔和胎儿图像进行训练建模;研发过程中,也要采集更多图像进行算法优化,从而实现“数据—模型—产品”的迭代,彻底改变了传统机电模式下硬件定版即功能固化的局限。

2.3 不同国家研发模式对比

各国医疗机器人的主流研发策略,背后是其医疗支付体系、产业结构与政策环境等因素决定的^[20]。而这些策略差异,为全球医疗机器人的发展提供了多样化的参考^[3]。

美国拥有发达的商业医疗保险体系,对经过验证的创新医疗技术具有较高的偿付意愿和能力。这种高溢价的市场环境,激励了企业敢于进行长周期、高投入的研发,从而形成了以直觉外科公司为代表的医疗机器人巨头。因此,美国的医疗机器人研发模式呈现出典型的企业主导特征。此外,美国产学研合作网络较为开放^[21],其高校科研机构在机器人研究中居领先地位^[16]。像约翰斯·霍普金斯大学的计算机辅助手术中心和斯坦福大学等,不仅是学术高地,更是机器人的产业孵化器。著名的达芬奇机器人公司,其技术源头就涉及斯坦福国际研究院。

在欧洲,以德国为例,研发模式更倾向于“医工

企协同”。德国依托弗劳恩霍夫协会等共性技术平台,形成了紧密的医工转化网络。不同于美国的巨头垄断优势,德国医疗机器人的主力军主要是大量专注于细分领域的中小企业。在政策上,德国“高技术战略 2025”中的机器人研究行动鼓励研究中心网络化,提高成果转化效率。此外,欧盟医疗器械新法规的实施大幅提高了医疗机器人监管门槛。这迫使中小企业必须采取协同研发模式,通过与高校、科研院所及临床中心的深度绑定来分摊成本。

日本是一个典型的老龄化国家,因此,其研发重点聚焦于康复与护理领域。日本政府实施了独特的“长期介护保险制度”,将部分护理机器人纳入医保支付范围。通过该政策,服务类机器人的用户成本降低,从而促进了日本以解决劳动力短缺为核心的研发导向。此外,日本“新机器人战略”及“Moonshot 型研发计划”中,明确将护理福利作为战略支柱,推动了松下、丰田等传统制造巨头向医疗服务机器人的跨界研发转型。

不同于美国的自下而上的医疗机器人研发模式,我国的研发主要由政策驱动,更多呈现“自上而下”的特征。例如,我国提出“十四五”机器人产业规划,旨在努力成为世界机器人技术与产业强国;同时,国家药监局优先审评高端医疗装备,以加速创新产品上市。近年来,政府大力倡导“产学研医”合作,涌现出如天智航、微创机器人和威高等一批依托协同创新模式快速成长的企业。相比于美国的商保支付和日本的介护保险,我国医疗机器人尚未纳入医保,因此患者自付比例高。这种医疗制度的差异,决定了我国的研发模式不能照搬其他国家的高成本路线,而应探索更具性价比和普惠型的本土化路径,特别是加快核心技术和零部件的国产化替代。

3 医疗机器人的研发原则

成功的医疗机器人产品,其背后必然是研发模式与临床应用场景的高度适配。不同类型的医疗机器人,其临床需求痛点、风险等级、资源依赖存在差异。一个有效的研发模式与应用场景匹配框架应是动态的闭环系统。本文将概括为“需求洞察→模式选择→资源整合→场景验证→迭代优化”。为确保研发过程始终围绕临床需求展开,需深入了解每一类医疗机器人的研发原则。然而,医疗机器人的分类方式多种多样,如基于控制方式分类,或是基于运动结构的分类等。在本章节,本文根据国际机器人联合会的分类框架^[22],将医疗机器人划分为手术

机器人、康复机器人和诊断与辅助服务机器人三大类别。选择理由是,该分类框架本质上是基于临床应用场景的划分,也最符合医疗工作者的分类直觉。这种基于场景的分类逻辑,与本文探讨的“临床需求决定研发模式”的核心论点具有内在的一致性,我们将在下文具体阐述。

3.1 临床需求结构化识别与定量描述

在研发初期,如何从复杂的医疗场景中准确识别临床需求,并将其转化为工程语言,是决定研发成败的第一步。首先,研发团队应明确需要研发的医疗机器人类型,是手术机器人,还是康复机器人,亦或是诊断与辅助服务机器人,确立临床需求的基本框架(具体如下文)。更重要的是,研发团队应针对具体医疗场景的临床路径进行精细化拆分,完成结构化识别。例如,可通过实地跟台和全流程录像等方式,将诊疗过程拆解为术前规划、术中操作和术后护理等独立动作单元。特别强调的是,临床需求必须完成从定性到定量的转化。在医疗场景中,临床医生往往基于主观经验和感受,将临床需求描述为诸如“手太累”“看不清”和“穿刺不准”等定性语言,而研发团队需要其转化为可验证的工程参数。例如,对于手术机器人,需将精准度量化为“末端重复定位精度(mm)”或“抖动滤除频率(Hz)”;将安全性量化为“出血量控制水平(ml)”等。而在诊断机器人中,除了要求准确率,还需要量化敏感度和特异度等指标;涉及到效率的,可量化为“单次扫描时间(s)”等。辅助服务机器人类型很多,一般侧重于量化效率指标。对于康复机器人,往往涉及多种康复指标的量化评估,比如“关节活动度”和“肌张力”等等。总之,只有当模糊的临床需求被结构化识别,并转化为具体的输入设计参数时,研发过程才具备明确的迭代目标,从而避免需求和技术脱节的困境。

3.2 手术机器人:以“安全与精准”为原则

手术机器人在特定的医疗场景已经较为成熟可靠。以达芬奇机器人为例,有研究证明其在非小细胞肺癌手术的淋巴结清扫数量和术后疗效上均优于胸腔镜手术^[23];国产的多孔机器人,也在胰腺外科等领域得到了广泛应用^[24]。手术机器人的研发,往往依赖与外科医生团队的深度合作,从而确保技术创新紧密贴合专业的手术需求。作为最高风险等级的医疗器械,手术机器人的研发必须严格遵循相关法律法规,动物实验和严谨的临床试验是不可避免的。此外,大部分巨头公司已经建立了牢固的技术

护城河,后续的企业在研发类似手术机器人时,需注意专利规避。

手术场景的核心临床痛点可归纳为 3 类:(1)复杂解剖场景的精准操作,比如盆腔狭小空间的肿瘤切除,以及脊柱手术中螺钉的置入。(2)安全保障。需要避免术中血管损伤,减少或防止出血等。(3)术式创新的技术支撑需求。可见,这些痛点决定了手术机器人在研发中,势必技术壁垒高、研发投入巨大、监管要求严苛,因此其研发极度依赖多方协作。手术机器人的初期理论和技术探索多由学术驱动(高校或者科研院所主导模式),而在成熟发展阶段,企业主导、“医工企”协同研发模式则成为主流。国际巨头公司往往通过强大的资本和工程能力主导。在此过程中,医院既是终端使用者,更是研发过程中的深度参与者。从手术流程定义,再到器械细节设计上,医院均提供关键临床输入,成为技术产品落地的纽带。

3.3 康复机器人:以“个性化与普适性”为原则

康复机器人旨在面向功能障碍患者提供辅助训练或生活支持。研究表明,相比传统的康复训练,康复机器人能够有效改善痉挛型脑性瘫痪患儿的下肢运动功能,提高其日常行动能力^[25-26];不仅如此,下肢康复机器人还可改善脑梗死后偏瘫患者的功能,比如步态时空参数和步行周期等指标^[27]。康复机器人以“个性化与普适性”为原则。具体而言,需做到安全有效的人机交互,准确识别患者的运动意图,并生成个性化训练方案及实现康复效果的量化评估。产品包括上下肢康复训练机器人、外骨骼机器人和智能假肢等。相比其他医疗机器人,其研发模式更强调长期临床实验,以验证康复的有效性。更重要的是,康复机器人需在性能和成本之间寻求平衡,因为其面向更广泛的患者群体、家庭场景及基层医院,成本控制是其能否普及的关键因素。另外,该研发模式需要重点考虑用户友好性,因为设备需要易于非工程背景的医疗人员甚至患者家属操作。在组织管理上,研发团队不仅需要工程师和临床医生,还需要康复治疗师、神经科学家和心理学家等多学科专家参与。

总之,康复机器人市场需求巨大,但产品形态多样,价格敏感度较高。康复机器人的研发模式呈现多元化:既有由大型企业主导的平台化产品研发,也有大量由高校科研成果转化而来的中小型创新企业,呈现出学术驱动向“产学研医”转化与企业主导

并存的局面。

3.4 诊断与辅助服务机器人:以“提高临床效率”为原则

提高诊断准确率、缩短诊断时间是诊断机器人的核心临床需求。研究表明,基于 CT 的 AI 辅助诊断系统对肺癌检测的敏感度为 0.87,特异度为 0.89,诊断比值比达 53.54,显著优于传统影像方法^[28];多 AI 系统对比显示,深睿 AI 对恶性肺结节检出的灵敏度达 89.7%,特异度为 82.4%,可辅助放射科医生提升诊断一致性^[29]。基层医院诊断能力不足、三甲医院阅片效率低等,一直是诊断机器人需要解决的临床痛点。由于在研发过程需要海量的高质量医疗数据,因此其研发模式往往离不开与医院的深度合作,以及高校或者企业提供的先进算法,即主要是“医工企”协同研发模式。而在研发的早期探索阶段,部分医院也会通过内部资源整合开展自主研发,为后续产业化奠定临床基础。需要注意,涉及诊断功能的人工智能软件,往往面临“软件即医疗器械”的监管挑战,因此各部门需在研发前进行深入调研。

辅助服务机器人,研发则更侧重于解决医院运营中的实际问题,如药品物资的自动化配送、环境消毒、导医咨询和护理监护等。研发的主要临床痛点是医护人员非诊疗工作量大、院内交叉感染风险高^[30]。这类机器人的研发周期相对较短,在研发中,必须考虑如何与医院物理环境和信息系统紧密集成,优化而非扰乱现有工作流程。该模式下的研发迭代速度快,因此可采用敏捷开发的模式。其研发目标是:形成标准化的医院运营提效解决方案,以便在不同医院、科室快速部署和复制。相比其他类型的机器人,服务机器人的监管门槛较低。目前来说,该类机器人产业主导研发模式特征显著:研发多由拥有成熟技术的科技公司主导,它们将通用机器人技术针对医院特定场景进行二次开发和定制。总之,辅助服务机器人研发模式更接近于消费级或工业级机器人的开发,与医疗机构的场景合作是成功的关键。

4 展望

4.1 重视多模态大语言模型在医疗机器人中的创新应用

随着新一代人工智能 ChatGPT、DeepSeek 等大语言模型在医疗决策中的重要潜力被挖掘,可以预见,其将在未来赋能多种医疗机器人。其中,多模态大语言模型(Multimodal Large Language Mod-

el, MLLM)凭借对文本、影像和临床数据的跨模态理解能力,可有望打破目前医疗机器人被动执行或者拓展性差的局限,构建“感知—分析—决策—反馈”的智能闭环。结合首都医科大学附属北京妇产医院在产前诊断的临床需求和研究工作,本节重点挖掘 MLLM 与医疗机器人在产前诊断中的融合应用场景,并分析其适应的研发模式。

产前诊断是一个典型的多学科交叉医学领域,医生需持续学习以处理每天复杂的遗传咨询工作。既往,这种知识密集型的医疗决策工作在传统的医疗机器人(或应用软件)中难以完成,而 MLLM 有望成为一种新途径,特别是有效整合既往医疗数据集。例如,医院产前诊断中心曾对 6 047 例高龄孕妇的胎儿染色体核型结果进行了大规模分析^[31],明确了不同年龄组及合并其他高危因素时的染色体异常风险。这种大规模的结构化临床数据集,是训练 MLLM 进行产前决策支持的宝贵资源。具体而言,通过医院内接入 MLLM,不仅可以实时为医生提供高质量的产前诊断知识库(指南和专家共识、文献书籍等),以辅助医生进行更科学的遗传咨询,还可综合患者的病例信息、影像学资料、罕见的面部特征及辅助检查等多模态数据,以更全面地进行诊断工作。例如,首都医科大学附属北京妇产医院研究证明^[32],MLLM 可通过识别罕见病患者疾病表型图像,辅助初级医生进行标准人类表型术语的识别,从而提高罕见病诊断效率。

可见,MLLM 有望成为医疗机器人中的一个智能中枢,其研发模式相较于传统研发经验,需经历更多的挑战。无论是哪种类型的医疗机器人,若想搭建 MLLM 模块用于医疗决策,就离不开高质量的医疗数据、先进的大语言模型相关算法及强大的算力资源。因此,搭建 MLLM 模块的医疗机器人研发模式,应是典型的“医工企”协作方式,并且需要三方的紧密合作:医院提出临床需求,并且提供医疗数据及进行标注;高校/科研院所提供先进的算法支持,并且关注快速发展的大语言模型技术动态;企业可以提供大语言模型所需的算力资源及将 MLLM 模块在医疗机器人中进行整合优化。当然,由于 MLLM 是较新的技术,其在医疗机器人中的有效整合和研发模式,仍需未来不断探索。

4.2 重视研发模式与临床需求的适配

需要说明的是,医疗机器人的产业化最终必然是以企业研发为主体。然而,在抵达这一终局之前,

选择何种“启动模式”至关重要。研发模式并非一成不变的标签,而是随着项目成熟度动态演化的过程。本文所强调的研发模式,重点在于指导医疗机器人创新研发的初期阶段。不同的临床需求催生不同的医疗机器人,而不同的医疗机器人需要抉择适合的研发模式。归根结底,是临床需求的差异决定了研发模式的选择逻辑。例如,在手术机器人场景,因其直接关系到患者的生命安全,通过“医工企”的深度协同研发模式来保障这种高风险产品的安全与可靠性是一种常用研发策略。而辅助服务机器人由于风险相对可控,在研发模式上可直接由企业主导,以实现产品的快速落地与市场化。当然,现实情况往往更为复杂,例如巨头企业往往拥有强大的学术研发能力,在创新研发中不一定需要高校资源的参与。

总之,重视研发模式与临床需求的适配不是将原则生搬硬套,而是谨记:只有以临床需求为导向,科学匹配相应高效合理的研发模式,才能从根本上规避技术与应用脱节,从而推动医疗机器人真正实现从实验室到病床旁的价值转化。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 钟威负责资料收集和论文撰写;闫有圣负责审阅和修改;阴赫宏负责研究设计、观点提炼以及论文的审阅和修改

参 考 文 献

- [1] International Organization for Standardization. ISO 8373:2021 Robotics-Vocabulary[S/OL]. Geneva: International Organization for Standardization, 2021[2026-05-27].
- [2] 刘伟,赵潇,傅扬. 医疗机器人研究、应用现状及发展趋势[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(12): 170-175. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1633. 2023. 12. 030.
- [3] 黎文娟,马泽洋,曾磊,等. 国内外医疗机器人发展现状及趋势[J]. 机器人产业, 2022(6): 72-86. DOI: 10. 19609/j. cnki. cn10-1324/tp. 2022. 06. 008.
- [4] 何炳蔚,张月,邓震,等. 医疗机器人与医工融合技术研究进展[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2021, 49(5): 681-690. DOI: 10. 7631/issn. 1000-2243. 212556.
- [5] 2025 年中国医疗机器人市场规模预测及行业投融资情况分析(图)-中商情报网[EB/OL]. [2025-12-24]. [https://www. askci. com/news/chanye/20250403/165514274367051362632761. shtml](https://www.askci.com/news/chanye/20250403/165514274367051362632761.shtml).
- [6] 中国医疗机器人行业发展深度研究与投资趋势预测报告(2024-2031 年)_观研报告网[EB/OL]. [2025-12-24]. [https://www. chinabaogao. com/detail/715771. html](https://www.chinabaogao.com/detail/715771.html).
- [7] 孙溥茜. 天智航:骨科手术机器人,做时间的朋友[J]. 机器人产业, 2021(6): 54-58. DOI: 10. 19609/j. cnki. cn10-1324/tp.

2021. 06. 009.

- [8] 郭进,苏河,马云涛. 国产图迈手术机器人 5G 信号+远程动物手术时主刀医师心理压力的调查与分析[J]. 中国普外基础与临床杂志, 2023, 30(10): 1205-1209. DOI: 10. 7507/1007-9424. 202305062.
- [9] 张霄琼,周逗逗,陆飞. 上肢多关节方向康复训练器联合傅利叶上肢机器人改善脑卒中患者上肢运动功能的效果[J/OL]. 中国医师杂志, 2025, 27(4): 564. DOI: 10. 3760/cma. j. cn431274-20240401-00564.
- [10] 舒之群,屈佳璐,张淑贤,等. 医疗机构在国产手术机器人“产学研医”协同创新转化模式中角色的探讨[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(5): 582-586. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-7104. 2023. 05. 022.
- [11] 张明亮,欧阳睿智,郭立泉,等. 一种上肢康复机器人及其康复评估应用研究[J]. 机械设计与制造, 2025, 409(3): 338-342, 349. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3997. 2025. 03. 062.
- [12] Lyu H, Kong D, Pang G, et al. GuLiM: A Hybrid Motion Mapping Technique for Teleoperation of Medical Assistive Robot in Combating the COVID-19 Pandemic[J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2022, 4(1): 106-117. DOI: 10. 1109/TMRB. 2022. 3146621.
- [13] Cepolina F, Razzoli R. Review of robotic surgery platforms and end effectors[J]. Journal of Robotic Surgery, 2024, 18(1): 74. DOI: 10. 1007/s11701-023-01781-x.
- [14] 崔青. 微创医疗实施“收购-孵化-分拆上市”资本运作模式的动因及效果研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2025.
- [15] Fusco M R, Chitale R. Neuroendovascular robotics: wave of the future or failed promise? [J]. Journal of NeuroInterventional Surgery, 2024, 16(3): 219-220. DOI: 10. 1136/jnis-2024-021555.
- [16] 马洪海,胡坚. 发展前进中的胸外科手术机器人[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2022, 3(1): 1-3, 85. DOI: 10. 12180/j. issn. 2096-7721. 2022. 01. 001.
- [17] 段星光. 医疗机器人核心技术及产业发展[J]. 机器人产业, 2023(4): 1-4. DOI: 10. 19609/j. cnki. cn10-1324/tp. 2023. 04. 012.
- [18] 王露. 机电技术在智能机器人中的应用研究[J]. 中国高新技术, 2022(23): 30-32. DOI: 10. 3969/j. issn. 2096-4137. 2022. 23. 011.
- [19] Fahrner L J, Chen E, Topol E, et al. The generative era of medical AI[J]. Cell, 2025, 188(14): 3648-3660. DOI: 10. 1016/j. cell. 2025. 05. 018.
- [20] 耿熙坪,屈航,闫灵均,等. 国内外医疗机器人产业发展现状分析[J]. 中国医学装备, 2025, 22(1): 82-89. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-8270. 2025. 01. 016.
- [21] Zhou P, Tijssen R, Leydesdorff L. University-Industry Collaboration in China and the USA: A Bibliometric Comparison[J]. PloS One, 2016, 11(11): e0165277. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0165277.
- [22] Guo Y, Yang Y, Liu Y, et al. Development Status and Multilevel Classification Strategy of Medical Robots[J]. Electronics, 2021, 10(11): 1278. DOI: 10. 3390/electronics10111278.

- [23] 刘星池,许世广,徐惟,等. 达芬奇机器人非小细胞肺癌手术疗效分析[J]. 中华腔镜外科杂志:电子版,2017,10(2):97-101. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2017.02.009.
- [24] 李景峰,施昱晟,邓侠兴,等. 国产多孔机器人手术系统在胰腺外科临床应用中的发展[J]. 外科理论与实践,2025,30(1):70-73. DOI:10.16139/j.1007-9610.2025.01.13.
- [25] 吕楠,尚清,马彩云,等. 康复机器人对痉挛型脑性瘫痪患儿的康复效果[J]. 中国实用神经疾病杂志,2017,20(7):45-47. DOI:10.3969/j.issn.1673-5110.2017.07.018.
- [26] 杨晓颜,周璇,靳梦蝶,等. 康复机器人结合中医推拿对痉挛型脑瘫患儿运动功能的影响[J]. 同济大学学报:医学版,2025:651-656. DOI:10.12289/j.issn.2097-4345.25147.
- [27] 赵波,王寒明,陈伟,等. 下肢康复机器人联合触觉振动反馈训练对脑梗死后偏瘫患者康复效果的研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文),2025,6(7):1187-1191. DOI:10.12180/j.issn.2096-7721.2025.07.019.
- [28] 董来东,黄果. 基于 CT 影像的人工智能辅助诊断系统对 4771 例肺癌诊断价值的系统评价与 Meta 分析[J]. 中国胸心血管外科临床杂志,2021,28(10):1183-1191. DOI:10.7507/1007-4848.202012022.
- [29] 钟丽茹,罗娜,贺露瑶. 多个人工智能辅助诊断系统对肺结节的诊断效能比较[J]. 影像研究与医学应用,2024,8(17):26-29. DOI:10.3969/j.issn.2096-3807.2024.17.008.
- [30] 叶华,张志尧,陈晓怡,等. 物流机器人在医院静脉配置药品配送中的应用[J]. 中华医院管理杂志,2019,35(7):610-613. DOI:10.3760/cma.j.issn.1000-6672.2019.07.020.
- [31] 宋伟,刘晓巍,山丹,等. 6047 例高龄孕妇胎儿染色体核型结果分析[J]. 实用妇产科杂志,2018,34(3):190-193.
- [32] Zhong W, Sun M, Yao S, et al. Enhancing the Accuracy of Human Phenotype Ontology Identification: Comparative Evaluation of Multimodal Large Language Models[J]. Journal of Medical Internet Research, 2025(27):e73233. DOI:10.2196/73233.

(收稿日期:2026-03-10)

关于人工智能辅助科研的诚信规范与伦理准则倡议

当前,人工智能技术在深度赋能全生命周期科学研究的同时,也带来众多科研诚信和伦理挑战。为强化科研管理领域的前瞻性治理与规范引导,促进健康科研生态,北京慢性病防治与健康教育研究会科研管理专业委员会于 2025 年 12 月 15 日发布《关于人工智能辅助科研的诚信规范与伦理准则倡议》。希望本倡议可促进人工智能技术在科研活动中的合理规范使用,促进科研创新,护航技术赋能,引导人工智能向善发展,促进公开、透明、可控、可信的诚信和伦理治理体系,共建健康、负责任、可持续的学术生态。

倡议全文:

1、倡导负责任地应用人工智能。鼓励将人工智能(以下简称“AI”)作为提升科研效率与拓展学术思维的有益工具,但应保证科研人员的主导地位,AI 不能替代研究者的核心思考与学术审核责任。

2、坚守数据安全与伦理准则。优先选用安全合规的 AI 平台,审慎评估风险,确保知识产权、研究对象隐私与数据安全。

3、保障研究过程透明性与可追溯性。在使用 AI 过程中保留关键操作记录,在方法、致谢或附录部分,具体说明使用场景、方式与贡献。

4、恪守诚信客观准则。使用 AI 工具时应严守诚信底线,不得利用 AI 进行伪造、虚构、篡改和抄袭,所有研究材料和成果必须基于真实、可验证的来源与过程。

5、警惕不公正的潜在偏见。主动审视并规避 AI 可能带来的算法偏见与伦理风险,推动科研成果在性别、种族、地域、语言及文化等维度上的公平性与包容性。

6、共建健康可持续的学术生态。鼓励学术群体开展经验交流与互相监督,推动行业自律,引领科研向善发展,共同营造规范、诚信、可持续的 AI 辅助学术研究环境。