

OrthoGPT: 面向精准诊疗的多模态骨科大模型

张志成¹, 王静^{2,3}, 张阳¹, 田永林², 张濛濛^{2,4}, 吕宜生², 王飞跃^{2,3,4}

(1. 中国人民解放军总医院第七医学中心, 北京 100010;

2. 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室, 北京 100190;

3. 澳门科技大学创新工程学院, 澳门 999078;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对骨科疾病诊疗面临的非医院场景下应急处理困难、手术规划复杂且风险高以及康复治疗个性化需求强等诸多挑战, 提出了面向骨科精准诊疗的多模态骨科大模型——OrthoGPT。该模型充分利用多模态特征对齐与融合技术和多场景个性化诊疗方案生成技术, 结合基于平行理论的骨科世界模型和多Agent智能交互方法, 为非医院场景提供初步诊断和应急指导, 模拟和预测个性化术后治疗效果, 辅助医生进行手术规划, 并提供个性化康复治疗建议。该模型旨在探讨OrthoGPT在骨科疾病诊疗中的应用潜力, 以期提高诊疗效率和提升效果, 改善患者体验, 推动人工智能技术在骨科疾病诊疗的发展和应用。

关键词: 骨科; 大模型; 智慧医疗; 平行医疗

中图分类号: TP399

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202433

OrthoGPT: multimodal generative pre-trained transformer models for precise diagnosis and treatment of orthopedics

ZHANG Zhicheng¹, WANG Jing^{2,3}, ZHANG Yang¹, TIAN Yonglin², ZHANG Mengmeng^{2,4},
LYU Yisheng², WANG Fei-Yue^{2,3,4}

1. The Seventh Medical Center of the General Hospital of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100010, China

2. State Key Laboratory of Multimodal Artificial Intelligence Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Faculty of Innovation Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This paper proposes OrthoGPT, a multimodal generative pre-trained transformer model designed for precise diagnosis and treatment of orthopedic diseases. It addresses several challenges in orthopedic care, such as the difficulties in emergency management outside hospital settings, the complexity and high risks associated with surgical planning, and the strong demand for personalized rehabilitation therapy. The model leverages multimodal feature alignment and fusion technology, multi-scenario personalized diagnosis and treatment plan generation technology, combined with an orthopedic world model based on parallel theory and multi-agent methods. It aims to provide preliminary diagnosis and emergency guidance in non-hospital scenarios, simulate and predict personalized postoperative treatment outcomes, assist doctors in surgical planning, and offer personalized rehabilitation treatment suggestions. The purpose of this paper is to explore the

收稿日期: 2024-04-06; 修回日期: 2024-07-12

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.62176266); 北京市自然科学基金项目 (No.J200012); 澳门特别行政区科学技术发展基金项目 (No.0145/2023/RIA3, No.0093/2023/RIA2)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62176266), Beijing Natural Science Foundation (No. J200012), The Science and Technology Development Fund of Macao Special Administrative Region (No.0145/2023/RIA3, No.0093/2023/RIA2)

potential applications of OrthoGPT in improving the efficiency and effectiveness of orthopedic diagnosis and treatment, enhancing the patient experience, and advancing the development and application of artificial intelligence in the field of orthopedics.

Key words: orthopedics, large language models, smart healthcare, parallel medicine

0 引言

随着大语言模型 (large language model, LLM) 的快速发展和普及, 以 GPT 为代表的大语言模型在各个行业中发挥着重要作用, 特别是在医疗领域, 大语言模型展现出了巨大的应用潜力。如 OpenAI 的 GPT-4 模型已被应用于医疗咨询服务, 通过理解和生成医疗语言, 帮助提供初步的健康建议和信息解答^[1]。BioGPT 则专注于生物学领域的自然语言处理, 从大量的科研文献中提取有用信息, 帮助科研人员快速了解疾病机理和药物发展趋势^[2]。由 Google Health 开发的 MedPaLM 模型, 专门针对医疗对话系统设计, 可以在与患者的交互中提供更准确的健康信息和医疗建议^[3]。继 BioBERT 之后, ClinicalBERT 更专注于临床医学文献的理解和应用, 从病历报告中提取病人信息, 支持医生进行疾病诊断和治疗方案的制定^[4]。这些模型不仅能处理和理解复杂的医疗数据, 还能在提供诊断支持、治疗建议以及分析医疗文献等方面展示其独特优势。通过深入学习专业知识库和临床记录, 大语言模型可助力提高医疗服务的效率和准确性, 为医疗行业带来创新的解决方案。

骨科疾病是一组影响骨骼、关节和肌肉系统的疾病, 包括但不限于骨折、骨关节炎、骨质疏松症和脊柱疾病。最近对 2019 年全球疾病负担数据的分析显示, 全球约有 17.1 亿人患有肌肉骨骼疾病, 包括腰痛、颈部疼痛、骨折、其他损伤、骨关节炎、截肢和类风湿性关节炎等^[5]。这些疾病不仅导致患者长期疼痛和活动受限, 还可能引发其他并发症, 严重影响患者的生活质量。骨科作为一门高度专业化的医学分支, 对精准诊疗有极高的要求。

当前的大语言模型虽然在处理通用医疗问题上表现出色, 但在解决骨科特有的复杂问题时, 还存在一定的局限性。在非医院场景 (如家庭、交通事故、战伤等) 下, 骨科患者在突发骨伤时往往无法及时获得专业的医疗指导, 如果错误处理, 会导致伤情加重, 增加后续治疗难度。在制定治疗方案时, 难以直观地预判某些治疗方案的具体效果, 增

加了治疗的复杂性和患者的心理压力, 尤其在骨科手术前, 难以清晰展示手术后的恢复情况, 这不仅增加了患者的焦虑, 还可能影响其对手术的信任和依从性。骨科手术方案的制定复杂且风险高, 需综合考虑患者病情、骨骼结构、手术技术等多种因素, 这些因素相互影响, 增加了手术难度和风险。当前的大语言模型在手术规划和实时导航辅助方面的应用仍有限, 难以应对手术中的复杂决策和精细操作要求。在康复治疗中, 现有模型缺乏个性化指导, 缺乏实时监测和对康复方案的动态调整, 无法全面满足不同患者的个性化需求, 导致提供的康复指导意见不够精准。

针对上述问题, 王飞跃研究员提出了平行理论与 ACP 方法^[6], 即人工系统 (artificial societies, A)、计算实验 (computational experiments, C) 和平行执行 (parallel execution, P)。ACP 方法为解决上述问题提供了新的途径。ACP 方法通过虚拟空间的计算实验整合复杂系统中难以量化的部分, 优化真实系统中复杂问题的解决方案, 并提出了平行医学、平行医院、平行慢病、平行痛风等方法^[7-11], 这些方法通过模拟和预测医疗过程, 优化诊疗方案, 提高了医疗服务的质量和效率。在外科手术相关领域, 提出了平行手术室、平行手术、平行麻醉等理论方法^[12-14]。平行手术通过构建虚拟手术环境, 模拟手术过程, 优化手术方案, 减少手术风险, 提高手术成功率; 平行麻醉通过实时监控和反馈, 优化麻醉方案, 确保手术过程的安全和患者的舒适; 平行手术室通过智能化管理手术室资源, 提高手术室的使用效率和手术过程的协调性。在疾病检索生成方面, 提出了相似病例推荐方法, 通过构建相似病例检索与答案评估模型, 为患者的医学问题生成答案, 实现了医学知识的检索生成问答服务^[15-16]。

通过融合平行理论与多模态大模型框架, 我们能够对虚拟环境中的各类数据^[17]和复杂场景进行深度学习训练, 这一过程有助于优化现实物理世界中的决策制定与执行策略, 实现复杂系统行为的精确模拟与预测, 为科学决策提供坚实依据。当前, 这一方法已在多个前沿领域展现出其应用潜力, 包

括药物系统研究、社会计算系统、机器人技术以及智能交通系统等^[18-26]。不少研究针对GPT、Sora等生成式大模型的核心原理与先进技术开展了广泛而深入的探讨与分析^[27-31]。在此基础上,本文依托平行医学理论框架,结合大模型领域的最新技术成果,提出了多模态骨科大模型——OrthoGPT,旨在通过对OrthoGPT的探讨,为骨科疾病的诊断和治疗提供新的工具和方法,推动大模型技术在骨科领域的进一步发展和应用,为相关领域学者和从业人员提供借鉴。

1 国内外研究现状

近年来,LLM在医疗领域展现了巨大的潜力,其应用范围包括诊断支持、临床决策辅助、患者教育和科研支持等。LLM在多个医学专业中的应用已展现出潜力,包括癌症诊断、牙科、肾病学和皮肤病学等,通过处理大量医学数据提高了医疗质量^[32]。ClinicalGPT通过整合大量和多样化的真实世界数据,如医疗记录、领域特定知识和多轮对话咨询,优化了LLM在临床场景中的应用。这种模型在多项任务中表现优异,包括医学知识问答、医学考试、患者咨询和诊断分析^[33]。大语言模型(如ChatGPT和Bard)因其生成对话和编码医学知识的能力在临床中具有潜在应用。

在骨科领域,有学者利用大语言模型进行了应用研究和验证,展示了大语言模型在提升医疗服务质量、辅助医疗教育和改进患者沟通方面的潜力。例如,ChatGPT在骨科实践中的应用可以促进患者信息交换、提供临床决策支持和优化治疗计划^[34]。有研究探讨了ChatGPT在高胫骨截骨术术前规划中的应用,尽管当前模型尚未优化到能够执行复杂的术前规划任务,但其潜力不容忽视^[35]。此外,LLM在医疗相关的教育和考试中的应用也备受关注,例如ChatGPT在美国肩肘外科医生认证考试中的出色表现,展示了其在专业教育和评估中的价值^[36]。LLM还在提高骨科文献的可读性和理解度方面表现出色,通过对人工智能生成的文本与人工撰写的文本进行比较,分析其在学术文献中的质量表现^[37]。在足踝影像学报告中,利用AI-LLM提高报告的可读性,有助于医生和患者更好地理解诊断信息^[38]。在脊柱手术的计费预测中,LLM展示了其在医疗计费中的潜力^[39]。此外,LLM还在智能机器人X线系统的自然语言控制中展示了应用前

景,提升了手术效率和精度^[40]。LLM在骨科手诊所中的应用显示了其作为临床助理的潜力,有助于提高医生与患者之间的沟通效率^[41]。

此外,LLM在患者管理和沟通中的应用也取得了显著成果。例如,在腰痛诊断和治疗指南中的表现,展示了大语言模型在处理复杂医疗指南方面的能力^[42];在骨科培训考试中的表现也表明其在教育和评估中的潜在应用^[43]。在骨科门诊中,LLM可以作为临床助理,提高医生与患者之间的沟通效率^[44]。总体来看,大语言模型在骨科领域的多种应用场景中展现出了巨大潜力和需求,随着技术的不断发展,大语言模型将发挥越来越重要的作用。

尽管LLM在骨科领域的应用已经取得了显著的进展,然而,通用大语言模型在临床应用中仍面临一系列挑战。首先是数据的多模态性,骨科数据包括文本、影像和生物信号等多种类型,如何有效地融合和解释这些不同类型的数据是一个关键问题。其次是临床准确性,在骨科诊断和治疗中,模型的输出必须非常精确,因为任何小的错误都可能导致严重的后果。确保模型输出的准确性是一个重要挑战。在个性化医疗中,骨科疾病的治疗方法需要根据患者的具体情况进行个性化调整。模型需要能够处理个体差异,并提供个性化的治疗建议。

通过多模态特征对齐与融合、提示工程(prompt engineering)、思维链(chain-of-thought, CoT)与检索增强生成(retrieval augmented generation, RAG)^[45]、骨科世界模型等技术,OrthoGPT可以为非医院场景下的骨科患者提供初步诊断和问答应急指导,通过模拟和预测生成个性化治疗效果,直观展示治疗方案的预期效果,帮助医生和患者做出更精准的决策;辅助医生进行手术规划,降低手术风险,提高手术成功率;根据患者的具体情况提供个性化的康复治疗建议,加快康复进程,实现骨科全流程的精准诊疗。

2 OrthoGPT模型

2.1 OrthoGPT整体架构

OrthoGPT包括多模态特征对齐与融合、多场景个性化诊疗方案生成技术、基于平行系统的骨科世界模型和基于Agent的全流程服务,模型结构如图1所示。

通过多模态特征对齐与融合,整合多源异构的患者数据,包括影像学数据(如MRI、CT、X线检

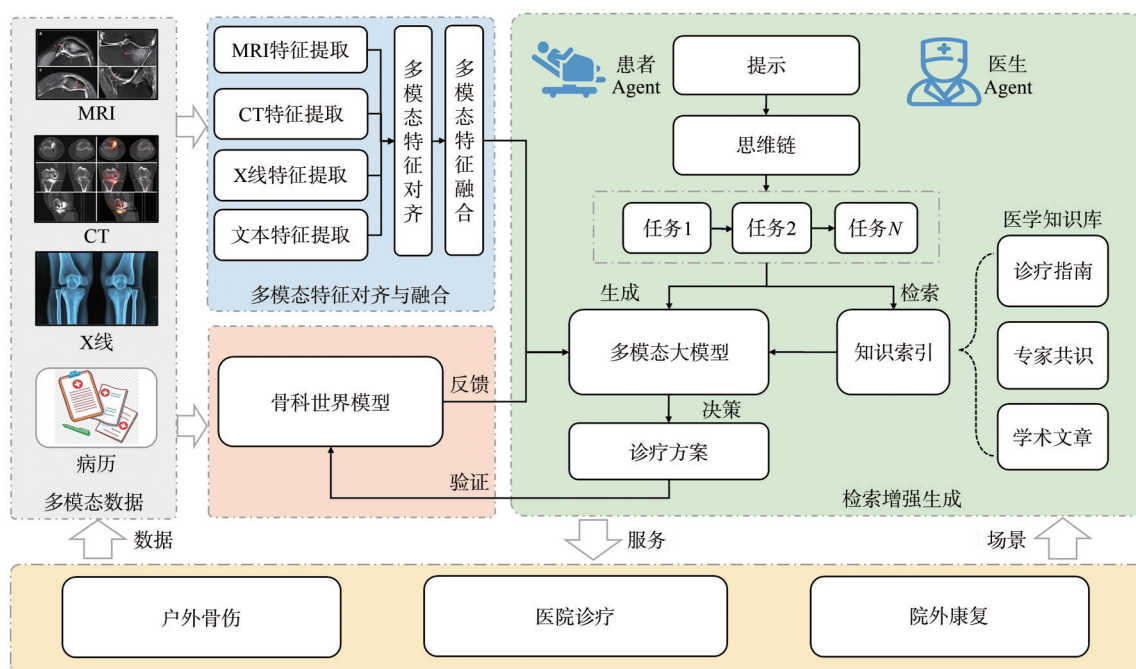


图1 OrthoGPT 架构

查)、电子病历中的文本数据(如主诉、病史、查体记录)以及检验数据(如血常规、血生化、尿常规)等。针对影像学数据,通过医学影像检测与分割技术提取影像组学特征,针对电子病历中的文本数据,则利用预训练语言模型进行语义特征提取。最终,通过多模态特征对齐与融合,成功整合各类异构数据,有效建立了影像学特征、文本语义特征以及检验指标等特征之间的深层关联,显著提升了多源数据的协同效应与信息利用效率。此方法为复杂临床数据的深度挖掘提供了有力支撑,极大地增强了多模态数据在医学诊断与分析中的应用潜力。

多场景个性化诊疗方案生成技术,为骨科患者提供不同场景下高度个性化的诊疗方案。首先,提示工程通过设计优化输入提示,将复杂的医疗需求转化为可操作的问题,能够引导模型进行有效的推理;其次,通过思维链逐步推理分解问题,确保诊疗方案生成的逻辑性与准确性;接着,利用检索增强生成技术深入挖掘医学知识库,检索与患者具体症状紧密相关的最新医学研究、临床试验结果和历史病例报告,通过多模态骨科大模型,将复杂的信息融合并转化为明确的诊断、治疗策略、药物选择以及康复指导。

基于平行系统的骨科世界模型,对生成的诊断与治疗方案进行验证与评估。基于平行系统的骨科世界模型,通过构建与实际诊疗场景同步的虚拟诊

疗场景,利用构建的虚拟手术室、医生 Agent 与患者 Agent 进行方案验证。患者 Agent 用于在虚拟场景中接受治疗方案,并验证方案的有效性。医生 Agent 则为患者 Agent 提供诊疗决策和方案制定,并为实际医生提供诊疗决策建议。护士 Agent 在骨科世界模型中为患者 Agent 提供护理服务。这些 Agent 在骨科世界模型中的协同工作可以不断迭代优化诊疗方案,直至生成最优治疗方案,确保生成的诊疗方案的安全性及有效性,提升患者的诊疗体验和疗效。

2.2 多场景个性化诊疗方案生成技术

多场景个性化诊疗方案生成技术综合利用提示工程、思维链、检索增强生成技术的优势,确保生成的诊疗建议既有专业诊疗依据又能满足个性化诊疗需求。多场景个性化诊疗方案生成技术的具体实现包括以下几个步骤。

提示工程通过设计和优化输入提示,指导生成模型产生期望的输出。在多模态骨科大模型中,提示工程用于将患者的复杂医疗需求转化为可操作的问题。这一过程可以通过模板化的提示或动态生成的提示实现,帮助模型更好地理解上下文,生成与患者需求相关的诊疗建议。

思维链是一种分步推理技术,通过将复杂任务分解为多个小问题,帮助多模态骨科大模型逐步推理和生成答案。它模拟了人类思考的过程,使生成

模型在处理多步骤任务时更加准确。在本文所述模型中, CoT用于将患者的需求分解为一系列相互关联的问题(如症状描述、相关检验结果、潜在病因等), 从而为后续的信息检索和生成步骤提供更清晰的逻辑框架。多模态骨科大语音模型中的提示工程与思维链引导如图2所示。

检索增强生成技术是一种大模型增强方法, 能够有效提升语言模型在各种任务中的表现, 尤其是在需要大量专业背景知识和信息整合的场景下, 其主要包含信息检索和生成模型两部分。首先, 信息检索通过访问医学知识库, 检索与当前患者症状、诊断相关的最新研究、临床试验数据和病例报告, 模型能够确保诊疗建议基于最前沿的医学研究和临床实践。接着, 生成模型将提示、检索结果信息与患者的多模态数据作为模型输入, 利用先进的自然语言处理技术, 将复杂的医学信息和患者特征转化为具体的诊疗方案, 涵盖了诊断结果、治疗方法、药物推荐以及后续护理等多个方面, 能够为每位患者提供最合适、最有效的诊疗方案, 显著提升诊疗效果和患者满意度。

2.3 基于平行系统的骨科世界模型

世界模型是一种全面、综合地描述和预测环境的方法, 通过处理感知信息和数据建模, 实现对物

体、场景、动作等要素的准确抽象和模拟。本文基于平行系统理论 ACP 方法, 结合实际诊疗场景数据, 构建了一个针对骨科诊疗场景和任务需求的虚拟诊疗场景, 即基于平行系统的骨科世界模型。基于平行系统的骨科世界模型通过定义不同的诊疗场景和任务, 支持虚拟 Agent 根据角色特性在虚拟世界中交互。每个 Agent 负责特定的服务环节, 协同工作, 在安全、可控的虚拟环境中进行各种诊疗方案的测试和验证。

在初诊阶段, 患者 Agent 通过与患者互动, 收集基本信息和症状描述。患者可以通过智能设备或应用程序输入病情数据, 如病史、症状、影像资料等。患者 Agent 利用自然语言处理技术, 将这些数据进行初步整理和分析, 并为医生提供详细且结构化的病情报告。在诊断和治疗决策过程中, 医生 Agent 根据患者 Agent 提供的初步报告, 结合诊断模型, 生成初步诊断结果和治疗方案建议, 辅助医生进行深入分析, 提供更多诊断选项和治疗方案参考信息。这一过程包括对多模态数据的综合分析以及对最新医学研究和临床指南的实时检索, 确保诊断和治疗方案的科学性和前沿性。康复过程中, 护士 Agent 负责支持随访和康复管理。通过定期与患者互动, 监控治疗进展和康复状况, 护士 Agent 会

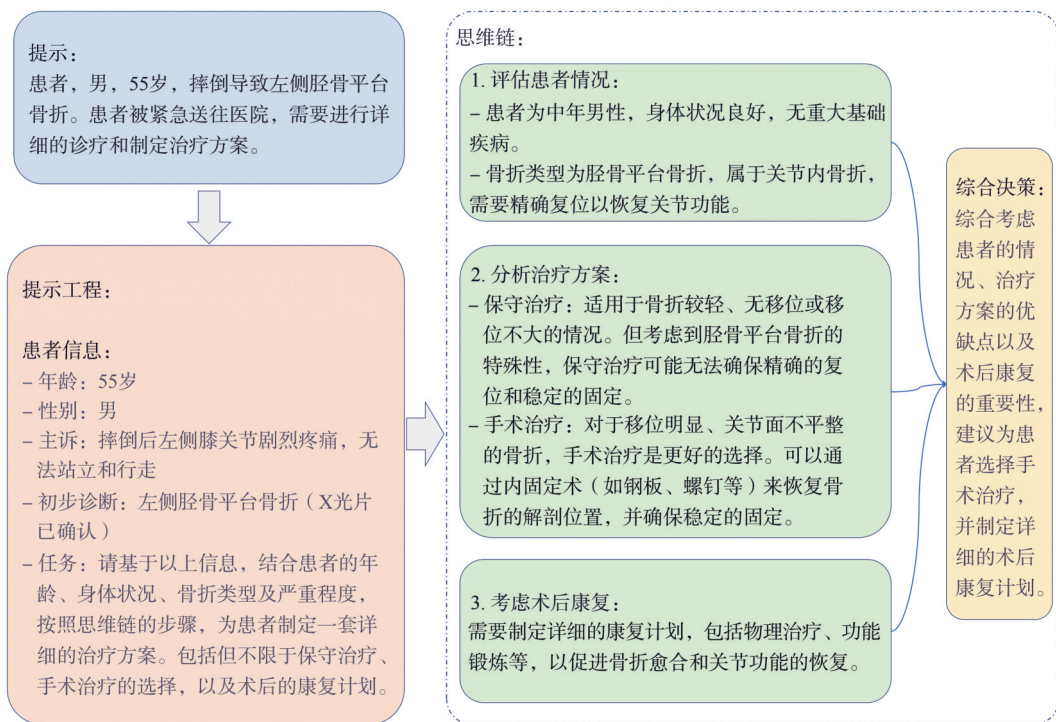


图2 多模态骨科大语音模型中的提示工程与思维链引导

根据这些信息进行分析,提供相应的护理建议和康复指导,如果发现异常情况,及时提醒医生进行进一步的诊断和调整治疗方案。这种持续的监控和反馈机制,确保了患者在整个治疗过程中的安全性和有效性。此外,Agent系统具有高度的灵活性和进化能力,可以在不同的医疗任务中构造不同的角色,并支持角色之间的交互。随着系统使用的数据和经验的积累,各个Agent能够不断进化,提升自身的能力和服务质量,提供越来越精准和个性化的医疗服务。引入基于Agent的骨科世界模型,实现了从初诊、诊断、治疗到随访的全面管理。

3 多模态骨科大模型应用

OrthoGPT通过多模态特征对齐与融合、多场景个性化诊疗方案生成、基于平行系统的骨科世界模型等关键技术,能够满足骨伤患者紧急救治、手术规划与导航辅助、康复指导等不同的骨科诊疗场景中的任务需求,提供骨科疾病的咨询、诊断、治疗和康复训练等全面的决策支持。以下是在典型场景中的具体应用。

3.1 骨伤患者紧急救治

在急性骨伤情况下,及时准确的处置对患者的预后至关重要。在实际应用中,当患者发生急性骨伤时,OrthoGPT可以通过情景描述和图像信息,迅速评估骨伤的严重程度和具体情况,识别骨折、脱位或其他损伤,生成个性化的紧急处理方案。例如,系统可以建议患者如何正确固定受伤部位,以避免进一步损伤,同时减轻疼痛。对于存在出血的情况,OrthoGPT可以提供止血措施的指导,确保患者能够在专业医疗人员到达之前进行有效的自我护理。此外,OrthoGPT还能通过移动设备或智能助手向患者提供实时的护理建议,帮助他们正确实施急救措施。这种紧急救治指导不仅能够提高初步处理的准确性,减少患者的不必要痛苦,还能后续专业医疗介入赢得宝贵时间。及时、正确的初步处理可以防止损伤恶化,降低并发症风险,进而改善患者的整体预后。

OrthoGPT在急性骨伤紧急救治中的应用,可以为急诊医疗提供精准、实时的救治指导,提升急诊处理的质量,减轻患者的痛苦。

3.2 手术规划与导航辅助

手术规划与导航辅助在骨科手术治疗中扮演着至关重要的角色,它们通过高精度的三维重建、实

时导航与定位技术,不仅显著提高了手术的准确性和安全性,还优化了手术流程,降低了风险和并发症,从而缩短了手术时间,加速了患者术后恢复,极大地提升手术效果。

OrthoGPT在手术规划与导航辅助方面通过个性化治疗效果生成和手术路径规划,为医生提供全面、详细的手术引导。在手术前,OrthoGPT利用患者的影像数据(如MRI、CT、X光等)和病史数据、体格检查等生成详细的手术模拟。这些数据经过系统的多模态特征对齐与融合处理,能够为医生提供清晰的三维手术视图和详细的解剖结构信息。通过这些模拟,医生可以预先规划手术路径,确定最佳的手术方案。这不仅有助于减少手术中的不确定因素,还能帮助医生预测手术中可能遇到的困难和挑战,提高手术的成功率。在手术过程中,系统通过基于平行系统的骨科世界模型中的手术过程验证,结合实时分析手术进展和患者的即时数据,指导医生进行精准操作。例如,OrthoGPT可以显示关键结构和手术路径,帮助医生在复杂的解剖环境中准确定位和操作。实时导航辅助能够显著减少手术时间,降低手术风险,提高手术效率和安全性。

通过提供全方位的手术支持,从手术前的详细规划,到手术中的实时导航,OrthoGPT不仅提高了手术的精准性和安全性,还显著改善了患者的整体治疗体验和预后效果。这种系统的全面应用,为骨科手术的智能化发展提供了有效的技术支持。

3.3 康复指导与智能助手

在康复阶段,OrthoGPT通过基于平行系统的骨科世界模型,为患者提供个性化、实时的康复指导,在康复过程中提供持续的监测和指导,显著提升康复效果和患者体验。系统通过分析患者的影像数据、生物信号和康复进展,提供详细的康复计划,包括具体的锻炼项目、频率和强度。这样的个性化方案确保了康复过程的针对性和有效性,能够更好地满足每位患者的独特需求。

在康复过程中,患者可以通过智能设备检测康复进展。OrthoGPT会实时分析这些数据,及时调整康复方案,并在基于平行系统的骨科世界模型中同步验证,确保康复效果的最大化。例如,如果OrthoGPT检测到患者的康复进展较慢或出现异常情况,可以立即建议调整康复计划,增加或减少锻炼强度,或者提供额外的护理建议。此外,智能助

手还可以提供即时的康复指导和支持。患者在康复过程中可能会遇到各种问题,智能助手能够通过多模态骨科大模型生成问题答案,随时回答患者的问题,提供科学的指导。

OrthoGPT通过个性化康复方案、实时监测和动态调整,确保了康复过程的科学性和高效性。这不仅可以加快患者的康复进程,还提高了康复质量,减少了并发症的风险。通过智能助手的持续支持和互动,患者能够获得全程的康复指导和心理支持,提升患者的康复效果和整体医疗体验,为骨科领域的智能康复发展提供了重要的技术支持。

4 总结与展望

OrthoGPT作为专为骨科医疗场景任务设计的多模态骨科大模型,通过多模态特征对齐与融合、多场景个性化诊疗方案生成、基于平行系统的骨科世界模型等技术,显著提升了骨科疾病的诊断、治疗和康复效率。其在骨伤患者紧急救治、手术规划与导航辅助以及康复指导与智能助手方面的应用,展示了强大的多模态数据处理和智能医疗服务能力,实现了从初诊到随访的全流程智能医疗服务,提升了骨科医疗服务质量。

未来OrthoGPT将在临床应用与验证、个性化医疗服务、多学科融合以及用户体验提升等方面继续优化。通过扩展多模态数据源、推动临床应用、优化个性化诊疗和康复方案生成、探索其他医学领域的应用,有望为推动智能医疗服务的智能化、个性化和高效化做出贡献,实现更好的治疗效果和医疗体验。

参考文献:

- [1] ACHIAM J, ADLER S, AGARWAL S, et al. GPT-4 technical report[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2303.08774.
- [2] LUO R Q, SUN L A, XIA Y C, et al. BioGPT: generative pre-trained transformer for biomedical text generation and mining[J]. Briefings in Bioinformatics, 2022, 23(6): 409.
- [3] SINGHAL K, AZIZI S, TU T, et al. Large language models encode clinical knowledge[J]. Nature, 2023, 620(7972): 172-180.
- [4] ALSENTZER E, MURPHY J R, BOAG W, et al. Publicly available clinical BERT embeddings[EB]. arXiv preprint, 2019, arXiv: 1904.03323.
- [5] CIEZA A, CAUSEY K, KAMENOV K, et al. Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. The Lancet, 2021, 396(10267): 2006-2017.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] WANG J, WANG X, GUO Y Y, et al. A parallel medical diagnostic and treatment system for chronic diseases[C]//Proceedings of the 2020 Chinese Automation Congress (CAC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 7412-7416.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 赵毅飞, 申乐, 叶佩军, 等. 平行麻醉: 从麻醉自动化走向智慧型全周期麻醉平台[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 234-246.
- [14] 王惠珍, 张捷, 俞怡, 等. 平行手术室: 围术期护理流程与智慧手术平台管理的新模式[J]. 模式识别与人工智能, 2023, 36(10): 867-876.
- [15] ZHAO Y F, SHEN L, YE P J, et al. Parallel anesthesia: from anesthesia automation to intelligent full-cycle anesthesia platform[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 234-246.
- [16] WANG H Z, ZHANG J, YU Y, et al. Parallel operating rooms: a new model of perioperative nursing process and smart surgical platform management[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2023, 36(10): 867-876.
- [17] ZHAO Y F, WANG J, WANG F Y, et al. Paragraph vector based retrieval model for similar cases recommendation[C]//Proceedings of the 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 2220-2225.
- [18] WANG J, MAN C T, ZHAO Y F, et al. An answer recommendation algorithm for medical community question answering systems[C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). Piscataway: IEEE Press, 2016: 139-144.
- [19] TIAN Y L, WANG X, SHEN Y, et al. Parallel point clouds: hybrid point cloud generation and 3D model enhancement via virtual - real integration[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2868.
- [20] 林飞, 王飞跃, 田永林, 等. 平行药物系统: 基于大语言模型和三类人的框架与方法[J]. 智能科学与技术学报, 2024, 6(1): 88-99.
- [21] LIN F, WANG F Y, TIAN Y L, et al. Parallel drug system: framework

- and method based on big language model and three kinds of people[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2024, 6(1): 88-99.
- [19] LIN F, GAO T, SUN D, et al. Parallel medical devices and instruments: integrating edge and cloud intelligence for smart treatment and health systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, accepted, doi: 10.1109/JAS.2024.124614.
- [20] WANG F Y, LI J J, QIN R, et al. ChatGPT for computational social systems: from conversational applications to human-oriented operating systems[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 10(2): 414-425.
- [21] QIN R, WANG F Y, ZHENG X L, et al. Sora for computational social systems: from counterfactual experiments to artificiofactual experiments with parallel intelligence[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024, 11(2): 1531-1550.
- [22] TIAN Y L, LI X, ZHANG H, et al. VistaGPT: generative parallel transformers for vehicles with intelligent systems for transport automation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(9): 4198-4207.
- [23] FAN L L, GUO C, TIAN Y L, et al. Sora for foundation robots with parallel intelligence: three world models, three robotic systems[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, 25(7): 917-923.
- [24] DAI X Y, GUO C, TANG Y, et al. VistaRAG: toward safe and trustworthy autonomous driving through retrieval-augmented generation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(4): 4579-4582.
- [25] YANG J, WANG X, ZHAO Y, et al. RAG-based crowdsourcing task decomposition via masked contrastive learning with prompts[EB]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2406.06577.
- [26] LI X, LIU E L, SHEN T Y, et al. ChatGPT-based scenario engineer: a new framework on scenario generation for trajectory prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(3): 4422-4431.
- [27] 卢经纬, 郭超, 戴星原, 等. 问答ChatGPT之后: 超大预训练模型的机遇和挑战[J]. 自动化学报, 2023, 49(4): 705-717.
- LU J W, GUO C, DAI X Y, et al. The ChatGPT after: opportunities and challenges of very large scale pre-trained models[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(4): 705-717.
- [28] 缪青海, 王兴霞, 杨静, 等. 从基础智能到通用智能: 基于大模型的GenAI和AGI之现状与展望[J]. 自动化学报, 2024, 50(4): 674-687.
- MIAO Q H, WANG X X, YANG J, et al. From foundation intelligence to general intelligence: the state-of-art and perspectives of GenAI and AGI based on foundation models[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(4): 674-687.
- [29] WANG F Y, MIAO Q, LI L, et al. When does Sora show: the beginning of TAO to imaginative intelligence and scenarios engineering[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 809-815.
- [30] 田永林, 王雨桐, 王建功, 等. 视觉Transformer研究的关键问题: 现状及展望[J]. 自动化学报, 2022, 48(4): 957-979.
- TIAN Y L, WANG Y T, WANG J G, et al. Key problems and progress of vision transformers: the state of the art and prospects[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(4): 957-979.
- [31] WANG F Y, MIAO Q H, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 575-579.
- [32] MUMTAZ U, AHMED A, MUMTAZ S. LLMs-healthcare: current applications and challenges of large language models in various medical specialties[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2311.12882.
- [33] WANG G Y, YANG G X, DU Z X, et al. ClinicalGPT: large language models finetuned with diverse medical data and comprehensive evaluation[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2306.09968.
- [34] GIORGINO R, ALESSANDRI-BONETTI M, LUCA A, et al. ChatGPT in orthopedics: a narrative review exploring the potential of artificial intelligence in orthopedic practice[J]. Frontiers in Surgery, 2023, 10: 1284015.
- [35] GENGATHARAN D, SAGGI S S, BIN ABD RAZAK H R. Pre-operative planning of high tibial osteotomy with ChatGPT: are there yet?[J]. Cureus, 2024, 16(2): e54858.
- [36] NAKAJIMA N, FUJIMORI T, FURUYA M, et al. A comparison between GPT-3.5, GPT-4, and GPT-4V: can the large language model (ChatGPT) pass the Japanese board of orthopaedic surgery examination?[J]. Cureus, 2024, 16(3): e56402.
- [37] HAKAM H T, PRILL R, KORTE L, et al. Human-written vs AI-generated texts in orthopedic academic literature: comparative qualitative analysis[J]. JMIR Formative Research, 2024, 8: e52164.
- [38] BUTLER J J, HARRINGTON M C, TONG Y X, et al. From jargon to clarity: Improving the readability of foot and ankle radiology reports with an artificial intelligence large language model[J]. Foot and Ankle Surgery, 2024, 30(4): 331-337.
- [39] ZAIDAT B, LAHOTI Y S, YU A, et al. Artificially intelligent billing in spine surgery: an analysis of a large language model[J]. Global Spine Journal, accepted, doi: 10.1177/21925682231224753
- [40] KILLEEN B D, CHAUDHARY S, OSGOOD G, et al. Take a shot! Natural language control of intelligent robotic X-ray systems in surgery[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2024, 19(6): 1165-1173.
- [41] KOTZUR T, SINGH A, PARKER J, et al. Evaluation of a large language model's ability to assist in an orthopedic hand clinic[J]. Hand, accepted, doi: 10.1177/15589447241257643
- [42] SHRESTHA N, SHEN Z K, ZAIDAT B, et al. Performance of ChatGPT on NASS clinical guidelines for the diagnosis and treatment of low back pain: a comparison study[J]. Spine, 2024, 49(9): 640-651.
- [43] LUBITZ M, LATARIO L. Performance of two artificial intelligence generative language models on the orthopaedic in-training examination[J]. Orthopedics, 2024, 47(3): 146-150.
- [44] CATERSON J, AMBLER O, CERECEDA-MONTEOLIVA N, et al. Application of generative language models to orthopaedic practice[J]. BMJ Open, 2024, 14(3): e076484.
- [45] 田永林, 王兴霞, 王雨桐, 等. RAG-PHI: 检索增强生成驱动的平行人与平行智能[J]. 智能科学与技术学报, 2024, 6(1): 41-51.
- TIAN Y L, WANG X X, WANG Y T, et al. RAG-PHI: searching for parallel people and parallel intelligence driven by enhanced generation[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2024, 6(1): 41-51.

[作者简介]



张志成 (1977-), 男, 博士, 中国人民解放军总医院派驻第七医学中心骨科主任, 主要研究方向为脊柱外科、人工智能与脊柱疾病。



王静 (1992-), 男, 澳门科技大学博士生, 中国科学院自动化研究所工程师, 主要研究方向为人工智能、平行智能理论与方法、机器学习、多模态大模型以及智慧医疗系统。



张濛濛 (2000-), 女, 中国科学院自动化研究所博士生, 主要研究方向为智慧医疗、计算机视觉。



张阳 (1984-), 男, 博士, 中国人民解放军总医院第七医学中心骨科副主任医师, 主要研究方向为人工智能在脊柱外科中的应用。



吕宜生 (1983-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所研究员, 主要研究方向为人工智能、机器学习、深度学习、多模态大模型、智慧交通、智慧医疗。



田永林 (1994-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统国家重点实验室助理研究员, 主要研究方向为平行系统、自动驾驶、场景工程。



王飞跃 (1961-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能和知识自动化。