

智能体在医疗健康领域的研究与应用^{*}

满坚平

黄国立

(中山大学中山医学院 广州 510080) (惠州学院计算机科学与工程学院 惠州 516007)

赖 聪

陈子怡

周 毅

(中山大学孙逸仙纪念医院 中山大学附属第一医院神经 中山大学中山医学院 广州 510080)
泌尿外科 广州 510120) 内科 广州 510080)

〔摘要〕 介绍智能体基础理论及相关算法, 阐述智能体在医疗仿真建模、医疗物联网、医学数据分析等多种场景下的研究现状, 探讨智能体在医疗健康领域的发展方向及其面临的挑战, 为实现智能化、鲁棒性更高的临床决策提供思路。

〔关键词〕 医疗健康; 智能体; 多智能体系统; 强化学习; 决策支持

〔中图分类号〕 R-058 〔文献标识码〕 A 〔DOI〕 10.3969/j.issn.1673-6036.2022.04.004

Research and Application of the Agent in the Field of Healthcare MAN Jianping, Zhongshan School of Medicine, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China; HUANG Guoli, School of Computer Science and Engineering, Huizhou University, Huizhou 516007, China; LAI Cong, Urology Surgery, Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510120, China; CHEN Ziyi, Department of Neurology, The First Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China; ZHOU Yi, Zhongshan School of Medicine, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China

〔Abstract〕 The paper introduces the basic theory and related algorithms of the agent, expounds the research status of the agent in various scenarios such as medical simulation modeling, Internet of Medical Things (IoMT), and medical data analysis, and discusses the development direction and challenges of the agent in the field of healthcare, so as to provide ideas for realizing more intelligent and robust clinical decision.

〔Keywords〕 healthcare; agent; multi-agent system; reinforcement learning; decision support

〔修回日期〕 2022-04-14

〔作者简介〕 满坚平, 博士研究生; 通讯作者: 周毅, 教授, 研究员, 博士生导师。

〔基金项目〕 国家重点研发计划“友好智慧健康宜居环境系统集成研究”(项目编号: 2021YFC2009402); 国家自然科学基金项目“基于非线性动力学驱动的癫痫发作预测深度学习研究”(项目编号: 61876194); 广东省自然科学基金项目“基于机器学习的癫痫发作预测脑电及多模态数据模型研究”(项目编号: 2021A1515011897); 广东省科技创新战略专项“泌尿系常见病智能诊疗与健康管理关键技术研究与示范”(项目编号: 202011020004); 广东省重大科技专项“膀胱癌人工智能一体化精准诊断平台的研发”(项目编号: 2018B010109006); 广州市重点研发计划“癫痫共病精神障碍的早期诊断和精准诊疗研究”(项目编号: 202206010028)。

1 引言

《“健康中国 2030”规划纲要》等系列政策的发布推动医疗健康服务向疾病预防、智能诊疗、健康管理等环节延伸，覆盖生命全周期、健康全过程。自 2016 年人工智能（Artificial Intelligence, AI）开始在医疗健康领域渗透与深度融合，借助科技赋能提升人类健康水平已形成全球共识^[1]。目前“AI + 医疗”从早期理论研究向应用探索发展，并结合大数据、5G、区块链、物联网等新一代信息技术推动医院数字化、智能化进程。人工智能发展通常可分为计算智能、感知智能和认知智能 3 个阶段^[2]。目前人工智能逐渐从感知智能向决策智能方向发展。基于智能体理论的决策智能在游戏领域得到突破性进展^[3]。随着健康医疗数据的爆发式增长人类的感知和决策能力往往无法有效满足大型、复杂、动态临床环境下的决策需求，迫切需要发展以智能体为载体的人工智能，实现人类智能与机器智能结合的智能人机交互与协同。

2 智能体概述

2.1 概念、特点及分类

2.1.1 概念 智能体（Agent）理论是计算机科学与人工智能的发展方向。1986 年人工智能之父 Marvin Minsky 在《心智社会》（*The Society of Mind*）中提出 Agent 理论^[4]。但目前 Agent 尚未形成统一定义且有多种译法，包括“智能体”“智能主体”“主体”“智能代理”等。本文中 Agent 是指与环境交互，并根据其已有知识及获得反馈更新其行为进行学习的决策实体^[5]。

2.1.2 特点及分类 智能体一般具有自治性、反应性、主动性、社会性等特征，此外还具有移动性、诚实性、友好性、理性等特性^[6]。依照不同分类标准智能体可分为不同类型^[7]。根据其属性智能体体系结构可分为审慎式、反应式和混合式^[8]。其中审慎式结构可用于复杂推理，反应式结构适合实时决策，混合式结构综合审慎式和反应式结构的优势，但系统复杂性较高，见表 1。

表 1 智能体分类

依据	分类
感知能力与智能	简单反射智能体、基于模型的反射智能体、基于目标的智能体、基于实用程序的智能体、学习智能体
属性	合作智能体、接口智能体、移动智能体、信息/互联网智能体、反应式软件智能体、混合智能体、异构智能体系统
主动性	纯反应智能体、纯计划智能体、混合智能体
适应性	学习智能体、包容智能体、非自适应智能体、基于约束的智能体
诚实性	诚实智能体、非诚实智能体
移动性	物理移动智能体、逻辑移动智能体
友好性	仁慈智能体、自利智能体、恶毒智能体
与环境交互方式	自治智能体、助手智能体、多智能体
物质状态	物理智能体、软件智能体
协作形式	通信智能体、非通信智能体

2.1.3 多智能体系统 通常单个智能体在资源条件和计算能力等方面受到限制，多个智能体协作、共同决策成为主流。多智能体系统（Multi - Agent System, MAS）^[9]由一组松散耦合的智能体交互协作完成其局部和全局目标，其智能可通过方法、函

数、过程、算法或强化学习来实现^[10]。多智能体系统具有自主性、容错性、灵活性、可扩展性、协作性等特点，为大规模分布式和自适应复杂系统发展提供了新思路。常见多智能体系统体系结构主要包括网络结构、联盟结构、黑板结构^[11]，见表 2。

表 2 MAS 体系结构分类及其特点

类型	特点
网络结构	智能体间直接通信，且通信和状态知识是固定的
联盟结构	智能体无需知道其他智能体的详细信息，具有较大灵活性
黑板结构	局部智能体将信息存放于可存取的黑板上，实现局部数据共享，但不适用于开放的分布式系统

2.2 多智能体强化学习基本理论

2.2.1 概述 强化学习与智能体理论结合发展了单智能体强化学习（Single Agent Reinforcement Learning, SARL）和多智能体强化学习（Multi Agent Reinforcement Learning, MARL）。SARL 通过智能体与环境的交互执行顺序决策，遵循马尔可夫决策过程或部分可观察马尔可夫决策过程，其目标是通过与环境的不断交互（即采取行动）学习最优策略，最大化累计回馈^[12]。

2.2.2 单智能体强化学习基本结构 本文重点关注基于马尔可夫决策过程的单智能体强化学习，见图 1。马尔可夫决策过程一般定义为多元组 $\langle S, A, R, f, \gamma \rangle$ ，其中 S 和 A 分别为智能体的状态和动作空间， R 为回报（或奖励）函数， f 为状态转移函数， γ 为折扣系数^[12]。

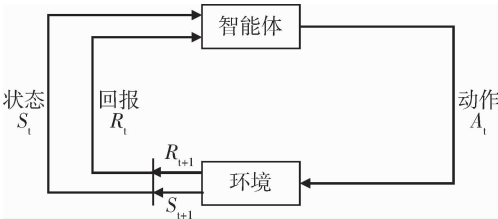


图 1 单智能体强化学习基本结构

2.2.3 多智能体强化学习基本结构 MARL 遵循马尔可夫博弈或随机博弈过程^[12]。随机博弈过程可定义为多元组 $\langle S, \{A_i\}_{i \in n}, \{R_i\}_{i \in n}, f, \gamma \rangle$ ，其中 S 为环境状态空间， A_i 为每个智能体的动作空间， $A = A_1 \times A_2 \times \cdots \times A_n$ 为所有智能体的联合动作空间，

R_i 为每个智能体的回报函数， f 为联合状态转移函数， γ 为折扣系数， n 为环境中智能体的数量^[10]，见图 2。

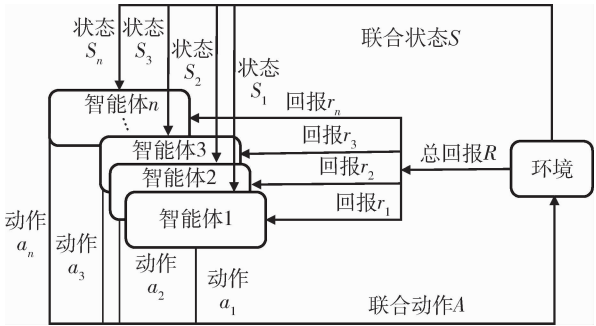


图 2 多智能体强化学习基本结构

2.2.4 MARL 分类及其算法 在博弈论领域 MARL 根据其要解决的任务类型可以分为完全合作型、完全竞争型和混合型^[12]。为了便于分析和计算，在竞争环境中通常讨论两个相互竞争的智能体，其中一个智能体的奖励是另一个智能体的损失，见表 3。

表 3 MARL 分类及其算法

类型	特点	算法
完全合作型	$R_1 = R_2 = \cdots = R_n = R$	Team - Q、Distributed - Q、JAL、FMQ、OAL 等
完全竞争型	$R_1 + R_2 + \cdots + R_n = 0$ (一般 n 为 2，即 $R_1 = -R_2$)	Minimax - Q
混合型	$R_1、R_2、\cdots、R_n$ 互不相关	Nash - Q、Correlated - Q、FF - Q、WoLF - IGA、WoLF - PHC、GIGA、GIGA - WoLF 等

3 国内外医疗智能体研究与应用现状

3.1 医学场景仿真建模

随着智能体仿真模型在医疗领域的应用^[13]，多智能体建模仿真（Multi - Agent Modeling and Simulation, MAMS）技术可解决不同复杂系统中的灵活组织和调度问题，适用于分布式仿真，具有较好稳定性和可重用性^[14]。在医疗领域中 MAMS 技术多用于传染性或流行性疾病传播、人群动态模拟、细

胞或神经元通信、医学教育等相关场景研究。国内外学者研究特定环境中个体在空间的行为模式和相互间的通信关系,利用可视化工具建模分析疾病在不同场景的传播过程,结合地理信息系统 (Geographic Information System, GIS), 统计学与人工智能技术探索疾病的时空传播规律。Younsi F Z 和 Hamdadou D^[15] 提出一种基于 MAS、SIR 模型和 GIS 的流行病传播仿真系统,旨在找出流行病传播的主要因素,监测疾病在时空上的传播并实现快速预警。Xiao S、Li Y 和 Sung M 等^[16] 根据 3 种主要传播途径 (空气传播、密切接触和污染物) 确定 7 种中东呼吸综合征传播模式,使用多智能体建模框架评估每种假设的感染风险。

3.2 基于数据融合与智能体的医疗物联网

医疗物联网 (Internet of Medical Things, IoMT) 已广泛应用于辅助监护、远程康复、移动健康、智慧养老等领域^[17]。考虑到患者远程监测的响应性和灵活性需求,国内外学者研究探索基于 MAS 的 IoMT 框架。Fernandes C O 和 De Lucena C J P^[18] 提出一种基于 MAS 的患者远程监控软件框架

IoT4Health, 自动远程实时监控患者活动。Liu X、Leon - Garcia A 和 Zhu P^[19] 通过设计软件定义的传感器、执行器和控制器,统一多个不同的物联网应用,提出面向智能家居的智能健康监测解决方案。在 IoMT 发展过程中,患者数据的隐私和安全受到高度关注。Polap D 团队将 IoMT 网络中的每个事物建模为对应智能体,利用区块链技术存储和保护数据^[20]并结合联邦学习,提出一种基于联邦学习和区块链的智能体架构^[21],在多个独立的设备上应用智能体训练模型,可为肺炎、癌症等疾病诊断任务创建不同的分类器。

3.3 基于智能体的医学数据分析

3.3.1 研究概况 自 20 世纪 50 年代以来,国内外学者一直致力于医疗信息系统研究,并进行健康医疗数据分析^[22-23]。目前国内外研究者已利用智能体理论,在临床文本数据、影像波形数据、生物组学数据等方面开展研究与分析,为疾病预测、分类诊断、治疗方案优化、健康管理等提供临床决策支持,见图 3。

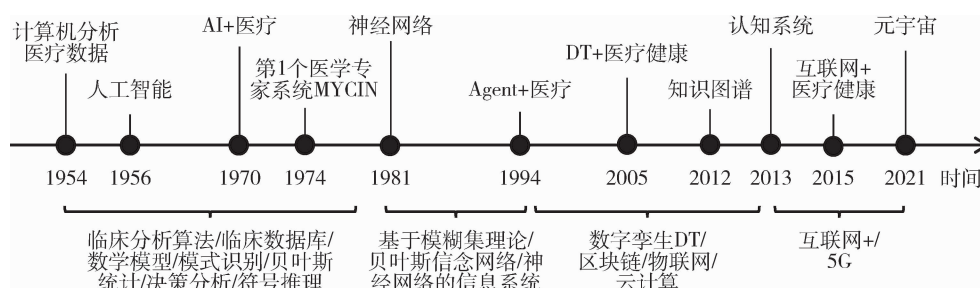


图3 基于信息技术的医疗健康数据分析

3.3.2 临床文本数据 主要呈现为电子健康档案 (Electronic Health Record, EHR), 电子病历等。我国学者针对治疗策略优化问题,提出一种结合 EHR 和深度 Q 网络的智能体强化学习算法 EHR - DQN^[24],为糖尿病并发症患者实现更准确的血糖控制。Atteya W A、Dahal K 和 Hossain M A^[25] 提出一种用于早期发现膀胱炎和肾盂肾炎的多智能体慢病诊断系统,集成两家医院的专病数据,利用 Apriori 算法进行疾病预测。

3.3.3 影像波形数据 包括 2D/3D 医学图像以及心电图、心电图信号等。Bennai M T、Guessoum Z 和 Mazouzi S 等^[26] 利用智能体在核磁共振图像中移动、交互和协调动作,实现对健康和病态大脑图像的识别。Liao X、Li W 和 Xu Q 等^[27] 提出一种基于 MARL 的交互式 3D 医学图像分割方法 IteR - MRL,对图像分割任务的动态过程进行建模。Pathirana S 团队研究证实了 MAS 对脑电图信号分类的适用性并将其部署在脑机接口系统中^[28]。

3.3.4 基于基因组、转录组、蛋白质组、代谢组等生物组学数据的早期筛查 其对癌症高危尤其是携带致病遗传基因的人群具有重要意义。Ramos J、Castellanos - Garzón J A 和 González - Briones A 等^[29]提出一种从 DNA 微阵列数据中进行基因选择和组织样本分类的多智能体系统,有效分类肺癌、结肠癌和白血病。刘健、顾扬和程玉虎等^[30]提出 BCDQN 和 PMDQN 两种 MARL 方法,并利用肿瘤基因组数据库(The Cancer Genome Atlas, TCGA)数据预测乳腺癌致病基因。

4 医疗智能体研究的挑战与应用展望

4.1 智能仿真:医疗仿真建模与数字孪生、元宇宙

随着数字孪生(Digital Twin, DT)在医疗领域的应用^[31]及元宇宙(Metaverse)的发展,智能体仿真与数字孪生、元宇宙等理论相结合将成为医疗仿真建模发展的新思路。目前已有研究探讨了 DT 与 MAS 的集成并在严重创伤管理中开展应用^[32]。Netlogo、Anylogic 作为通用的多智能体建模工具普遍应用于粗粒度或个性化场景下复杂问题的建模。但 MARL 算法并未沿用这类工具。针对更加复杂的医学环境建模仿真任务,在现有软件能力匮乏的情况下,基于逻辑推演的特征选取考验研究者对问题的经验判断能力,为医疗智能体的研究带来不少阻力。

4.2 智能感知:数据驱动物联网及传感器网络

环境智能的发展极大丰富了通过环境传感获得的数据或信息。但在建设医院智能环境前需要重视感知智能所面临的挑战^[33]。多智能体系统由于其特有的动态能力与分布式认知一致原理,将推动数据驱动的物联网及传感器网络实现具有自主行为的感知智能。多智能体协作理论在落地实践过程中仍存在诸多问题。多智能体分层协作框架 Hit - MAC^[34]可有效控制有限数量的传感器,实现全局最优的目标覆盖。但不同结构、不同数量的智能体在组合过程中会形成不同规模的一阶、二阶乃至高阶的异构智能体拓扑。面向带时滞一致性问题,需要专门针

对多智能体通信过程中产生的物理性质时延、测试噪声、数据丢包、量化误差等要素进行处理。

4.3 智能人机交互:多智能体深度强化学习

复杂临床环境下(如多学科会诊、疑难重症诊疗等),人工求解能力往往无法有效应对复杂决策问题,而机器难以处理非形式化的隐形问题。发展人机智能交互,建立医生、患者、智能体、临床环境全方位影响要素的内在关联,将适应和预测医生与患者的交互行为。多智能体深度强化学习^[35]可解决 MAS 环境中的众多复杂任务问题(如高维状态空间下状态特征建模等),将为人机智能交互与协同提供更有利的条件。非平稳性、给定通信及计算效率等因素可能对多智能体深度强化学习的决策性产生影响^[36-37]。Deepmind 与 OpenAI 机构的研究重心在于场景背后的算法原理(如 StarCraft2 RTS 对抗环境),而 SARL 常用的 Gym 虚拟环境并不适用。目前仅以 Terry J K、Black B 和 Grammel N 等^[38]提出的 PettingZoo 作为 Gym 通用环境的延续。

4.4 智能决策:多智能体临床决策支持系统与医院智能体

“互联网+医疗健康”的快速发展,推动临床决策从集中式发展为网络环境下的分布式,对精准医学研究具有积极意义^[39]。面向专病临床决策需求,结合多智能体、专病库、知识库、本体和各种推理模式,发展多智能体临床决策支持系统,将有效改善分布式环境内医学数据的学习过程,提高决策系统的鲁棒性、可靠性、灵活性。面向智慧医院管理的决策问题,“全场景智能”将成为智慧医院建设的发展方向。华为发布行业首个医院智能体,其进一步发展还需要建立配套体制,进行定期迭代更新。在智能决策过程中,医疗数据质量和决策结果的透明化也是关乎智能体决策效果的重要因素。

5 结语

产业互联网的“存量变革”背景下,人机融合智能将成为“AI+医疗健康”发展的新常态。针对

特定人群、特定业务、特定需求的智能应用以及便捷、智能、精准、高效的医疗健康服务模式,将是未来信息化发展的重要方向。智能体理论作为人工智能的研究方向将推动人机协同决策与智能交互的发展。随着强化学习和深度强化学习在医疗健康领域的研究应用,智能体理论与其结合将更加适应当前大型、动态、复杂的临床环境,为临床决策提供更灵活、稳健、智能化的支持。目前国内外学者已从医学仿真建模、医疗物联网、医学数据分析等方面开展医疗智能体研究,为疾病预防、诊断治疗、健康管理等提供智能决策支持。但面对临床复杂环境,智能体建模工具的可及性、多智能体的协作能力、医疗数据的质量、决策结果的可解释性等问题仍是影响智能体理论在医疗健康领域发展的重要因素。未来智能体理论可在智能仿真、智能感知、智能人机交互、智能决策等方面深入研究与应用,结合数字孪生、元宇宙等新元素,将推进其在医疗健康领域的探索与实践,共同为“AI+医疗健康”注入新活力,助推智慧医疗健康的发展与建设。

参考文献

- 1 Wang L, Wang H, Huang Y, et al. Trends in the Application of Deep Learning Networks in Medical Image Analysis: Evolution between 2012 and 2020 [J]. *European Journal of Radiology*, 2022 (146): 110069.
- 2 王军, 曹雷, 陈希亮, 等. 多智能体博弈强化学习研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57 (21): 1-13.
- 3 Vinyals O, Babuschkin I, Czarnecki W M, et al. Grandmaster Level in StarCraft II Using Multi-agent Reinforcement Learning [J]. *Nature*, 2019, 575 (7782): 350-354.
- 4 Mobus G E. The Agent Model. *Systems Science: Theory, Analysis, Modeling, and Design* [M]. Cham: Springer, 2022: 509-545.
- 5 Saggio V, Asenbeck B E, Hamann A, et al. Experimental Quantum Speed-up in Reinforcement Learning Agents [J]. *Nature*, 2021, 591 (7849): 229-233.
- 6 Yadav S P, Mahato D P, Linh N T D. Distributed Artificial Intelligence: A Modern Approach [M]. Boca Raton: CRC Press, 2020: 1-3.
- 7 Kumova B Ī, Heye S B. A Survey of Robotic Agent Architectures [C]. Malatya; 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), IEEE, 2017.
- 8 Delgado-Hernández X S, Morales-Rodríguez M L, Rangel-Valdez N, et al. Development of Conversational Deliberative Agents Driven by Personality via Fuzzy Outranking Relations [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2020, 22 (8): 2720-2734.
- 9 Ye D, Zhu T, Zhou W, et al. Differentially Private Malicious Agent Avoidance in Multiagent Advising Learning [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 50 (10): 4214-4227.
- 10 孙或, 曹雷, 陈希亮, 等. 多智能体深度强化学习研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56 (5): 13-24.
- 11 唐子惠. 医学人工智能导论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.
- 12 Zhang K, Yang Z, Başar T. Multi-agent Reinforcement Learning: A Selective Overview of Theories and Algorithms [EB/OL]. [2021-04-28]. <https://arxiv.org/abs/1911.10635v1>.
- 13 Megiddo I, Colson A, Chisholm D, et al. Health and Economic Benefits of Public Financing of Epilepsy Treatment in India: An Agent-based Simulation Model [J]. *Epilepsia*, 2016, 57 (3): 464-474.
- 14 Fan W, Chen P, Shi D, et al. Multi-agent Modeling and Simulation in the AI Age [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2021, 26 (5): 608-624.
- 15 Younsi F Z, Hamdadou D. Dynamic Contact Network Simulation Model Based on Multi-Agent Systems [J]. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics (IJHISI)*, 2021, 16 (4): 1-21.
- 16 Xiao S, Li Y, Sung M, et al. A Study of the Probable Transmission Routes of MERS-CoV During the First Hospital Outbreak in the Republic of Korea [J]. *Indoor air*, 2018, 28 (1): 51-63.
- 17 Philip N Y, Rodrigues J J P C, Wang H, et al. Internet of Things for in-home Health Monitoring Systems: Current Advances, Challenges and Future Directions [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39 (2): 300-310.
- 18 Fernandes C O, De Lucena C J P. A Software Framework for Remote Patient Monitoring by Using Multi-agent Systems Support [J]. *JMIR medical informatics*, 2017, 5 (1): e6693.
- 19 Liu X, Leon-Garcia A, Zhu P. A Distributed Software-defined Multi-agent Architecture for Unifying IoT Applica-

- tions [C]. Vancouver; 2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). IEEE, 2017.
- 20 Połap D, Srivastava G, Wozniak M. Multi-agent Architecture for Internet of Medical Things [M]. Cham: Springer, 2020; 49–58.
 - 21 Połap D, Srivastava G, Yu K. Agent Architecture of an Intelligent Medical System Based on Federated Learning and Blockchain Technology [J]. Journal of Information Security and Applications, 2021 (58): 102748.
 - 22 Akbari Z, Unland R. A Powerful Holonic and Multi-agent – Based Front – End for Medical Diagnostics Systems. Handbook of Artificial Intelligence in Healthcare [M]. Cham: Springer, 2022; 313–352.
 - 23 Ma M, Cheng Y, Wei X, et al. Research on Epileptic EEG Recognition Based on Improved Residual Networks of 1 – D CNN and indRNN [J]. BMC Medical Informatics and Decision Making, 2021, 21 (2): 1–13.
 - 24 Li T, Wang Z, Lu W, et al. Electronic Health Records Based Reinforcement Learning for Treatment Optimizing [J]. Information Systems, 2022 (104): 101878.
 - 25 Atteya W A, Dahal K, Hossain M A. Multi-agent System for Early Prediction of Urinary Bladder Inflammation Disease [C]. Cairo; 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. IEEE, 2010.
 - 26 Bennai M T, Guessoum Z, Mazouzi S, et al. A Stochastic Multi-agent Approach for Medical – image Segmentation: Application to Tumor Segmentation in Brain MR Images [J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2020 (110): 101980.
 - 27 Liao X, Li W, Xu Q, et al. Iteratively – refined Interactive 3D Medical Image Segmentation with Multi-agent Reinforcement Learning [C]. Seattle; Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.
 - 28 Pathirana S, Asirvatham D. Applicability of Multi-agent Systems for Electroencephalographic Data Classification [J]. Procedia Computer Science, 2019 (152): 36–43.
 - 29 Ramos J, Castellanos – Garzón J A, González – Briones A, et al. An Agent – based Clustering Approach for Gene Selection in Gene Expression Microarray [J]. Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences, 2017, 9 (1): 1–13.
 - 30 刘健, 顾扬, 程玉虎, 等. 基于多智能体强化学习的乳腺癌致病基因预测 [J]. 自动化学报, 2022 (48): 1–13.
 - 31 Hernandez – Boussard T, Macklin P, Greenspan E J, et al. Digital Twins for Predictive Oncology Will Be a Paradigm Shift for Precision Cancer Care [J]. Nature Medicine, 2021, 27 (12): 2065–2066.
 - 32 Croatti A, Gabellini M, Montagna S, et al. On the Integration of Agents and Digital Twins in Healthcare [J]. Journal of Medical Systems, 2020, 44 (9): 1–8.
 - 33 Haque A, Milstein A, Fei – Fei L. Illuminating the Dark Spaces of Healthcare with Ambient Intelligence [J]. Nature, 2020, 585 (7824): 193–202.
 - 34 Xu J, Zhong F, Wang Y. Learning Multi-agent Coordination for Enhancing Target Coverage in Directional Sensor Networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2020 (33): 10053–10064.
 - 35 Hernandez – Leal P, Kartal B, Taylor M E. A Survey and Critique of Multiagent Deep Reinforcement Learning [J]. Autonomous Agents and Multi – Agent Systems, 2019, 33 (6): 750–797.
 - 36 Haotian F, Hongyao T, Jianye H, et al. Deep Multi-agent Reinforcement Learning with Discrete – continuous Hybrid Action Spaces [C]. Macao; Proceedings of the 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'19), 2019.
 - 37 Nguyen T T, Nguyen N D, Nahavandi S. Deep Reinforcement Learning for Multiagent Systems: A Review of Challenges, Solutions, and Applications [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50 (9): 3826–3839.
 - 38 Terry J K, Black B, Grammel N, et al. Pettingzoo: Gym for Multi-agent Reinforcement Learning [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021 (34): 1–12.
 - 39 刘迷迷, 杜国霞, 周毅, 等. 专病数据库建设与应用研究 [J]. 医学信息学杂志, 2021, 42 (11): 81–86, 93.