

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.03.028

人工智能赋能的远程康复在儿童发育迟缓居家干预中的应用模式与工程实现综述

胡 玲¹, 黄 勇², 王 英¹

(1. 重庆市九龙坡区人民医院 儿童康复科, 重庆 400050;

2. 交信(浙江)信息发展股份有限公司, 杭州 314050)

【摘要】发育迟缓儿童的早期干预对改善预后至关重要,但传统康复长期受困于专业资源分布不均。信息通信技术使家庭场景远程干预成为可能,人工智能的深度嵌入正从根本上变革该领域范式。本文围绕人工智能赋能的远程康复在儿童发育迟缓居家干预中的应用,从技术底座到临床落地进行全景综述。研究阐释了计算机视觉、机器学习及多模态融合等核心技术如何支撑早期识别、量化评估、个体化方案生成及动态追踪,并从系统工程视角解构了平台架构逻辑、算法迭代路径及数据安全屏障。通过比较代表性临床原型与商业化平台,提炼了各技术路线的应用场景与功能边界。尽管潜力巨大,该领域在临床循证验证、模型泛化、隐私伦理及支付机制等维度仍存突出短板。未来发展关键在于构建“临床需求牵引—技术创新驱动—产业价值转化”的闭环,形成循证实践标准与普惠化服务体系。

【关键词】人工智能; 远程康复; 儿童发育迟缓; 居家干预; 工程实现

【中图分类号】 R749.94

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2026) 03-0147-05

A review of application models and engineering implementations of artificial intelligence-enabled telerehabilitation in home-based interventions for children with developmental delay

HU Ling¹, HUANG Yong², WANG Ying¹

(1. Department of Pediatric Rehabilitation, Jiulongpo District People's Hospital, Chongqing 400050, China;

2. Transportation Telecommunication & Information Development Inc. Ltd. Zhejiang, Hangzhou 314050, Zhejiang, China)

【Abstract】 Early intervention in children with developmental delay is crucial to optimize long-term prognosis, but traditional rehabilitation has long been trapped by uneven distribution of professional resources. Information and communication technology enables remote intervention in home scenarios, while the deep embedding of artificial intelligence (AI) is fundamentally transforming the field paradigm. This paper focuses on the application of artificial intelligence-enabled telerehabilitation in home intervention of children with developmental delay, and provides a panoramic review from technical base to clinical landing. This paper explains how the core technologies such as computer vision, machine learning and multi-modal fusion support early recognition, quantitative evaluation, individualized scheme generation and dynamic tracking, and then deconstructs the platform architecture logic, algorithm iteration path and data security from the perspective of system engineering. Moreover, through the comparison of representative clinical prototypes and commercial platforms, the application scenarios and functional boundaries of each technical route are refined. However, despite it possesses tremendous potential, this field still has outstanding shortcomings in the dimensions of clinical evidence-based verification, model generalization, privacy ethics and payment mechanism. Therefore, the key to future development lies in building a closed loop of “clinical demand traction-technological innovation drive-industrial value transformation” to form evidence-based practice standards and inclusive service system.

【Key words】 Artificial intelligence; Telerehabilitation; Developmental delays in children; Home intervention; Engineering realization

收稿日期: 2026-01-12。

基金项目: 2023 年重庆市九龙坡区技术预见与制度创新科技项目 (编号: 2023-03-013Y)。

作者简介: 胡 玲, 硕士研究生, 副主任医师, 研究方向: 儿科常见疾病的诊断治疗, 抽动障碍, 多动障碍, 发育迟缓。E-mail: hulinggz@126.com。

儿童神经发育障碍涵盖孤独症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD)、注意缺陷多动障碍 (attention-deficit hyperactivity disorder, ADHD) 及全面性发育迟缓 (generalized developmental delay, GDD) 等亚型, 系儿童期致残的主要病因之一^[1]。此类儿童发育迟缓的患病率居高不下, 加之康复周期漫长且强度显著, 持续加重全球公共卫生体系的承载负荷。传统干预模式以医疗机构和专业人员为核心支点, 但服务半径受限、家庭经济与照护压力突出、训练频次及连贯性难以保障等结构性矛盾始终存在^[2]。远程康复作为健康服务供给范式的革新路径, 依托信息通信技术突破空间壁垒, 使专业康复资源下沉至社区及居家场景成为可能^[3]。该模式早期形态多限于单向视频督导或远程数据采集, 用户交互深度与方案个体化程度尚处较低水平。

近年来, 人工智能 (artificial intelligence, AI) 在感知、决策及内容生成等维度的能力跃迁, 为远程康复领域注入了关键动能^[4]。AI 技术不仅可自动化、精细化解析儿童行为表征与生理指标, 更能依托数据驱动型模型输出动态可调、因人而异的干预策略, 进而支撑闭环运行、自适应迭代且具备规模扩展潜力的智能康复生态建设^[5]。从基于计算机视觉的微观行为解析, 到生成式 AI 赋能的教案设计, 诸多前沿技术应用正加速由实验环境向家庭场景迁移^[6]。

本综述拟系统呈现 AI 赋能的远程康复在儿童发育迟缓居家干预中的整体图景, 对其底层技术机理、工程落地路径及现阶段应用进展予以深度剖析, 并就核心瓶颈与未来趋势展开讨论, 旨在为该领域纵深探索与标准化推进提供参考。

1 技术基础: AI 与远程康复的融合框架

1.1 多模态数据感知技术

AI 模型的训练与优化高度依赖于高质量数据支撑。鉴于儿童发育迟缓涵盖运动、认知、言语及社会交往等多维功能域, 需通过多模态信息采集实现对患儿状态的全面刻画。借助常规光学或深度成像设备, 计算机视觉系统可在无接触条件下捕获面部神态、视线轨迹、肢体运动路径及互动行为模式^[7]。运动学参数与肌电活动模式分别由可穿戴惯性测量单元和表面肌电传感器进行量化采集, 以评估动作协调品质与肌肉募集特征^[8]。语音声学特征经由环境麦克风阵列记录, 而虚拟现实 (virtual reality, VR) 与

增强现实 (augmented reality, AR) 终端在创设沉浸式训练情境的同时, 亦成为高维行为数据的采集端口^[9]。上述异构多源信息相互补充, 共同搭建儿童发育特征的数字表征底座^[10]。

1.2 核心智能算法与模型

AI 算法需针对不同发育维度呈现差异化的功能适配。融合卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 与时序建模的视频解析方法, 已能以较高精度识别共同注意、社会性微笑等关键社交行为及刻板动作模式^[11]。语音处理技术除用于语言水平判定外, 亦可借助情感计算框架推断儿童情绪状态^[12]。尤为重要的是, 图神经网络 (graph neural network, GNN) 等多模态融合策略可将视觉、声学、生理及交互信息加以整合, 形成对儿童综合能力的整体性刻画^[13]。基于此, 强化学习与生成式模型可依据实时评估反馈, 对训练任务的难度梯度、内容构成及呈现形式进行动态调控, 进而达成干预策略的个体化匹配与自适应迭代^[14]。

2 应用模式: 全链条智能干预的实践路径

2.1 儿童发育迟缓的早期筛查与客观化评估

在早期筛查与识别环节中, AI 提供了突破传统量表局限的客观化手段。研究者通过采集婴幼儿观看特定社会性视频时的眼动数据, 借助机器学习技术解析其对社会刺激的注意力分配差异, 为 ASD 的早期预警提供量化依据^[15]。部分系统将标准化发育筛查量表转化为互动式游戏情境, 依据儿童在游戏过程中的反应时滞、操作准确度及问题求解路径, 自动输出发育商数或风险分层结果, 使筛查兼具趣味性与低觉察度^[16]。评估维度上, AI 算法通过整合可穿戴传感器的运动学参数、生理指标及行为影像, 提取发育性协调障碍相关的精细动作控制特征^[17]。自动语音识别与自然语言处理技术对儿童自发语言进行转录与解析, 精准测算平均句长、词汇丰富度及语法结构复杂程度, 形成更为精细的语言能力剖面^[18]。

2.2 个性化居家干预与自适应训练

AI 赋能的核心价值集中体现于居家干预的个体化与自适应性。现有系统主要依托智能方案生成、实时交互导引及难度动态调控三条路径达成这一目标。基于初步评估所获信息, 平台可从结构化活动库中自动筛选并组合形成覆盖多发育域的日度训练方案^[19]。部分产品集成大型语言模型, 依据儿童当

下兴趣偏好自动生成适配其认知水平的社交叙事或对话情境^[20]。训练执行阶段,计算机视觉技术对儿童动作表现进行实时捕捉,经由 AR 视觉提示或虚拟教练语音反馈实施即时纠偏^[21]。平台综合任务完成精度、反应时滞及持续注意时长等表现指标,运用强化学习机制自动调整任务难度梯度,确保训练负荷始终处于“最近发展区”的最优挑战区间^[22]。

2.3 居家远程监测与数据驱动的效果评价

在远程监测与疗效评估环节中, AI 实现了过程性数据的自动采集与智能解析^[23]。平台可自动生成涵盖训练依从程度、任务达成率及情绪行为演变等维度的数字化记录。借助长时序数据的深度分析, AI 算法能够将儿童在各目标技能上的习得进程予以可视化呈现,同时识别进步停滞或技能退化迹象,并实时向康复师推送预警信息^[24]。此种以数据为驱动的监测范式,促使疗效评价由离散时点测量转向连续性过程追踪,为干预策略的实时调整提供依据^[25]。

3 工程实现: AI 远程康复的系统架构与关键技术挑战

3.1 “云-边-端”协同系统架构

在工程落地层面,典型平台多是采用“云-边-端”分层协同的计算范式^[26]。家庭端设备主要承担前端信息采集、轻量实时运算及交互反馈职能,以满足动作纠偏等低时延场景需求。云端则负责海量数据存储、复杂模型训练迭代、个体化方案统筹管理及康复师远程协作接口供给。该架构需在实时响应、算力效能、数据安全与使用体验之间实现精细权衡^[27]。具体工程难点涵盖:资源受限终端的轻量化模型部署、多模态数据时序同步与对齐、契合儿童认知特征及家长操作偏好的交互界面设计,以及符合医疗数据安全规范的隐私防护机制构建^[28]。图 1 为 AI 远程康复系统典型架构示意图。

3.2 临床有效性挑战

临床价值与循证层级是判定该技术能否纳入医疗体系的标尺。现阶段多数研究局限于小样本可行性验证或初步疗效探索,尚缺乏大样本量、多中心协作及长周期随访的随机对照试验提供支撑^[23]。疗效评价维度亦需突破任务完成率等近端指标局限,更加聚焦于核心症状缓解、适应功能提升及生活质量改善等远端结局^[29]。构建获业界广泛认可的数字生

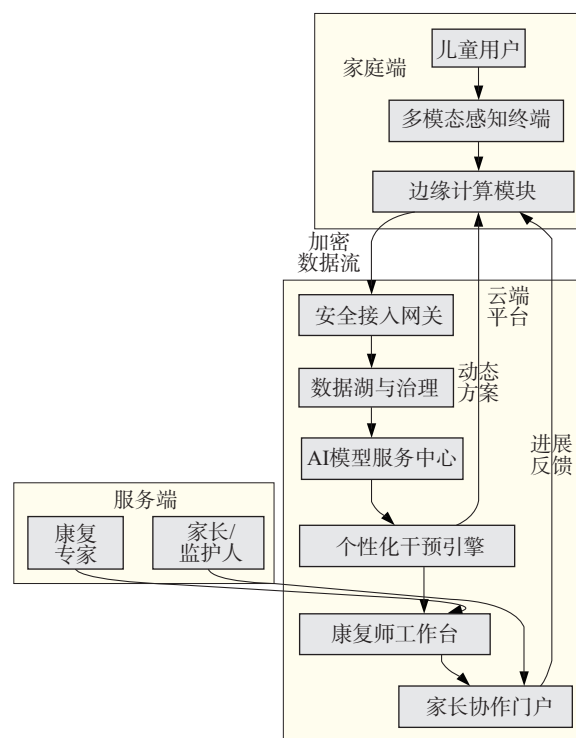


图1 AI远程康复系统典型架构示意图

注: AI: 人工智能。

物标志物体系与数字化结局评估框架,对技术效果的客观判定具有关键意义^[25]。

3.3 数据治理与实施障碍

数据既是 AI 发展的根基,亦是核心制约因素^[10]。儿童发育迟缓相关数据的标注工作对专业背景与人力投入要求极高,经济成本显著;标注规范的不一致性还制约了数据模型在不同数据集间的泛化迁移。加之伦理审查与法律规制对儿童敏感信息的流通施加严格限制,可供模型训练的大规模数据集获取相对困难^[28]。联邦学习等隐私计算范式支持在不暴露原始数据的前提下开展协同建模,为突破数据“孤岛”困境提供可行性路径^[26],然而其在跨机构医疗环境中的规模化落地尚处在探索初期。

实施环节的非技术性壁垒同样值得关注^[28]。具体涵盖康复从业者与患儿家庭对新技术的接纳程度及操作素养、服务费用的承担主体与偿付机制尚未明晰,以及数字终端与网络条件差异可能导致健康公平性恶化^[2]。AI 技术的临床转化成效不仅取决于其内在效能,还受制于配套培训机制、医保报销政策、伦理操作规范及包容性设计的协同支撑^[30]。

4 挑战与展望:迈向可持续的智能康复生态

4.1 技术演进与临床研究前沿

AI驱动的远程康复正经历由技术验证向深度临床整合的关键转型。技术迭代方向体现为多模态信息更深层次的协同解析及人机交互的自然化升级^[10]。具身智能、脑机接口等前沿方向有望与该领域交叉融合,借助神经信号直连或实体机器人辅助,营造更具沉浸感与生态效度的康复情境^[31]。因果推断范式的引入,将助力研究突破现有相关性分析的局限,揭示干预手段与功能增益之间的因果链路,进而支撑靶向性更强的策略制定^[25]。临床研究层面,后续研究建议着力构建更高层级的循证体系^[29],这不仅要求开展大样本随机对照试验,还需依托标准化、多维度的结局工具实施长周期追踪^[23]。同时,研究议题需从“疗效有无”的初阶判断,深化至“特定人

群、特定情境、特定机制下的最优效应”辨析,即向精准化康复范式推进^[1]。以生物标志物、行为表型及环境因素为分层依据构建预测模型,是实现干预方案个性化适配的核心路径^[15]。

4.2 生态系统构建与政策支持

生态体系建设需产业、学术、研发与临床多方深度合作^[30],协同推进数据规范、算法验证、疗效评价及伦理指南等行业标准共识^[27-28](图2)。政策维度方面,构建契合数字健康服务属性的监管体系与偿付机制,是激发创新活力并保障长期可持续性的制度基石^[2,32]。归根结底,依托技术创新、循证积淀、模式迭代与生态完善的多维联动,AI赋能的远程康复有望融入儿童发育迟缓干预体系,成为兼具可及性、效率与人文关怀的关键技术环节,使更多患儿及家庭于日常情境中获取连贯且优质的专业支持^[30]。

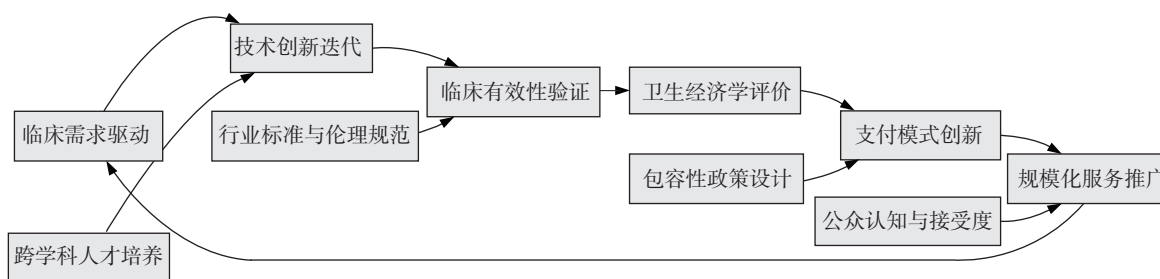


图2 可持续智能康复生态系统构建循环

5 结论

AI与远程康复的深度耦合,为破解儿童发育迟缓干预资源匮乏与服务可及性不足的全球性困境提供了前瞻路径。依托计算机视觉、机器学习及多模态融合等技术协同,智能化平台已贯通自动化筛查、量化评估、个体化训练及动态追踪的全流程,在提升干预效能、拓展服务半径方面展现出显著潜能。尽管如此,算法泛化稳定性、临床循证层级、隐私安全保障、费用偿付机制及健康公平性等仍构成突出瓶颈。技术价值的终极兑现,关键在于其能否嵌入临床场景并转化为正向健康产出。后续需在高质量证据支撑下促进多学科协同,打造用户为中心、伦理规制前置、运营模式可持续的服务格局,使技术创新切实惠及广大患儿及其家庭。

参考文献

[1] 郑娟, 徐颖霞, 杨文翰, 等. 数字化、人工智能技术辅助早期筛查和早期诊断儿童孤独症谱系障碍[J]. 广东药科大学学报, 2024, 40 (5): 123-126.

[2] 廖洪波, 杨潇, 成露, 等. 探索脑瘫儿童全面康复的经济实用新模式: 附“六位一体”疗法康复脑瘫儿童50例情况报告[J]. 中国康复理论与实践, 2008, 14 (8): 763-764.

[3] FRIGERIO P, DEL MONTE L, SOTGIU A, *et al.* Parents' satisfaction of tele-rehabilitation for children with neurodevelopmental disabilities during the COVID-19 pandemic[J]. BMC Prim Care, 2022, 23(1):146.

[4] OLERIBE O O. Leveraging and Harnessing Generative Artificial Intelligence to Mitigate the Burden of Neurodevelopmental Disorders (NDDs) in Children[J]. Healthcare, 2025, 13(15):1898.

[5] LI Y, LIAO I Y, ZHONG N, *et al.* Generative AI Enables the Detection of Autism Using EEG Signals[C]. CCBR 2023 (Chinese Conference on Biometric Recognition), 2023:375-384.

[6] 李坤, 宋富洋, 孙瑞. 行为分析疗法结合计算机言语疾病矫治对自闭症患儿心理状态及社交沟通能力的影响[J]. 中国健康心理学杂志, 2026, 34 (1): 28-32.

[7] DAWSON G, CAMPBELL K, HASHEMI J, *et al.* Author Correction: Atypical postural control can be detected via computer vision analysis in toddlers with autism spectrum disorder[J]. Sci Rep, 2020, 10(1):616.

[8] 刘巍, 丁娜. 可穿戴技术在脑瘫儿童运动康复中的应用进展[J]. 体育画报, 2025 (23): 82-84.

[9] JULRODE P, WORRAGIN P, ARIYA P, *et al.* Designing

- Gamified Virtual Reality Intervention Based on Experiential Learning to Enhance Social Reciprocity in Children with Autism Spectrum Disorder[J]. *Educ Sci*, 2025, 15(9):1104.
- [10] YAN Y, ABDULLAH E. Trends in Multimodal Artificial Intelligence for Autism Research in Children and Adolescents: A Scientometric Study[J]. *J Korean Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2025, 36(4):185-195.
- [11] 王永固, 张晨熹, 许家奇, 等. 基于深度学习的孤独症儿童学习情绪智能感知[J]. *现代教育技术*, 2021, 31 (7): 105-111.
- [12] 陈可萍, 谢欣蕾, 唐丽, 等. AIGC 环境下特殊儿童语言学习能力提升策略研究[J]. *启迪*, 2025 (9): 272-274.
- [13] ARULDASS S D, JAYAGOPAL P. Classifying distinct emotions from parents of ASD child using EEG source data by combining Bernoulli-Laplace Prior and graph neural networks[J]. *Neural Comput Appl*, 2025, 37:7877-7895.
- [14] 徐姝蕊, 杨茂巍, 詹佳宏, 等. rTMS 联合心理行为干预对 ADHD 儿童核心症状、行为问题和执行功能的影响研究[J]. *医药前沿*, 2026, 16 (4): 113-116, 120.
- [15] MERTZ L. Using AI and ML to Predict Autism Spectrum Disorder[J]. *IEEE Pulse*, 2024, 15(3):11-15.
- [16] BEATINI V, COHEN D, PELLERIN H, *et al.* Measuring perspective taking with the “Virtual Class” videogame: A child development study[J]. *Comput Hum Behav* 2024, 151:108012.
- [17] 陈怡静, 黄美欢, 周春明, 等. 书写评估工具在发育性协调障碍儿童中的应用进展[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2025, 40 (8): 636-640.
- [18] 赵健翔, 吴振起, 王雪峰, 等. 基于机器学习的注意力缺陷多动障碍风险预测研究[J]. *中国中西医结合儿科学*, 2024, 16 (2): 130-136.
- [19] 朱明慧, 赵晓犀. 心智障碍儿童家庭服务的社工站实践[J]. *中国社会工作*, 2024 (12): 28-28.
- [20] EGGER H, DAWSON G, HASHEMI J, *et al.* Automatic emotion and attention analysis of young children at home: a ResearchKit autism feasibility study[J]. *NPJ Digit Med*, 2018, 1:20.
- [21] BHATT S K, LEON N I D, AL-JUMAILY A. Augmented Reality Game Therapy for Children with Autism Spectrum Disorder[J]. *Int J Smart Sens Intell Syst*, 2014, 7(2):519-536.
- [22] JYOTI V, LAHIRI U. Virtual Reality Based Joint Attention Task Platform for Children With Autism[J]. *IEEE Trans Learn Technol*, 2020, 13(1):198-210.
- [23] FONG S S M, GUO X, CHENG Y T Y, *et al.* A Novel Balance Training Program for Children With Developmental Coordination Disorder: A Randomized Controlled Trial[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2016, 95(16):e3492.
- [24] RANKIN J A, TOMENY T S, BARRY T D. Multi-informant assessment of siblings of youth with autism spectrum disorder: Parent-child discrepancies in at-risk classification[J]. *Res Dev Disabil*, 2017, 68:78-87.
- [25] GELMAN K, FLETCHER D, LI H, *et al.* The use of telehealth in pediatric neurosurgery for rural patients of Appalachia[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2025, 36(6):755-763.
- [26] RAI S. A novel hybrid deep learning model using MEResNext for autism spectrum disorder detection[J]. *Comput Biol Chem*, 2026, 120(Pt 1):108619.
- [27] GERKE S, BABIC B, EVGENIOU T, *et al.* The need for a system view to regulate artificial intelligence/machine learning-based software as medical device[J]. *NPJ Digit Med*, 2020, 3:53.
- [28] 张悦玥, 董素贞. 多模态 MRI 在胎儿/儿童脑发育及神经发育障碍疾病中的应用进展[J]. *国际医学放射学杂志*, 2025, 48 (6): 672-677.
- [29] HOU W, ZHANG L, LI J. Sensorimotor synchronization in children with autism spectrum disorder: The role of timing and modality[J]. *Psychon Bull Rev*, 2026, 33(1):29.
- [30] 应桂花, 施旭爱, 宋籽良. 基于远程医疗实现的孤独症谱系障碍患儿康复训练模式构建与应用[J]. *临床精神医学杂志*, 2025, 35 (4): 298-302.
- [31] 孙金磊, 杜亚松. 虚拟现实技术在注意缺陷多动障碍诊疗中的应用[J]. *中国儿童保健杂志*, 2018, 26 (1): 37-39, 47.
- [32] MACCHITELLA L, ACCOGLI G, BARRACO G, *et al.* A Two-Step Neurorehabilitation Program Utilizing Extended Reality and Telerehabilitation for Children with Cerebral Palsy: A Pilot Study on Effectiveness, Adherence, and Technical Feasibility[J]. *Appl Sci*, 2024, 14(24):11961.