

• 综 述 •

可穿戴设备评估儿童神经发育障碍的研究进展

潘彦铮^{1,2}, 付竹梅³, 计岳龙^{1,2}

1. 北京大学公共卫生学院妇幼卫生学系, 北京 100191; 2. 北京大学医学部-潍坊市妇幼健康联合研究中心, 北京 100191;
3. 潍坊市妇幼保健院

摘要: 神经发育障碍(NDDs)是一组常见的疾病,表现为儿童时期开始的神经系统发育和功能障碍。神经发育障碍研究迫切需要实用的方法进行早期诊断与防治。本文介绍了应用可穿戴设备评估儿童神经发育障碍疾病的现状和展望。

关键词: 可穿戴设备; 神经发育障碍; 人类活动识别; 儿童

中图分类号: R179 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-6579(2025)06-0633-05 **doi:** 10.11852/zgetbjzz2024-0926

Advances in wearable devices for assessing childhood neurodevelopmental disorders

PAN Yanzheng^{1,2}, FU Zhumei³, JI Yuelong^{1,2}

1. Department of Maternal and Child Health, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China;
2. Peking University Health Science Center-Weifang Joint Research Center for Maternal and Child Health,
Beijing 100191, China; 3. WeiFang Maternal and Child Health Hospital

Corresponding authors: JI Yuelong, E-mail: yuelong.ji@pku.edu.cn; FU Zhumei, E-mail: fu_zm@163.com

Abstract: Neurodevelopmental disorders (NDDs) are a group of common conditions characterized by developmental and functional impairments of the nervous system beginning in childhood. There is an urgent need for practical methods for the early diagnosis and prevention of NDDs. This review discusses the current situation and prospects of wearable electronic devices in assessing neurodevelopmental disorders in children.

Keywords: wearable electronic devices; neurodevelopmental disorders; human activity recognition; children

神经发育障碍(neurodevelopmental disorders, NDDs)影响人群广泛且后果严峻,但其早期诊断与防治在研究中仍显不足,亟需更多关注。本文综述了可穿戴设备在评估儿童神经发育障碍中的应用现状及其未来展望,旨在为神经发育障碍儿童的早期评估与诊断提供新的视角与参考。

1 神经发育障碍概述

神经发育障碍是一组常见的疾病,表现为儿童时期开始的神经系统发育和功能障碍^[1],主要包含注意缺陷多动障碍(attention deficit hyperactivity disorder, ADHD)、孤独症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)、智力发育障碍(intellectual disability, ID)、交流障碍(communication disorders, CDs)、以及其他特定性神经发育障碍。总体而言,NDDs影响了超过10%的全球儿童,且这一比例在全球仍呈现持续上升趋势^[2]。

目前神经发育障碍的病因尚不明确,临床实践中神经发育障碍不同疾病分类之间的共病现象十分普遍且缺乏有效的治愈方法^[3-4],神经发育障碍一旦患病,将伴随终身,对儿童及其家庭在教育、医疗、经济、就业及生活质量等多方面造成严重影响^[5],并带来沉重的社会负担^[6]。同时,许多神经发育障碍都伴随着功能相关的运动发育缺陷^[7-8],这些问题严重影响患者日常生活以及社会认知发展,但在筛查中往往未得到及时评估^[9]。在这样的背景下,基于生理活动和动作模式监测的可穿戴设备的出现为神经发育障碍评估诊断提供了一种新的可能。

2021年国务院印发的《中国儿童发展纲要(2021—2030年)》明确指出,心理行为异常是影响我国儿童健康的重点问题^[10]。因此针对神经发育障碍这类常见的高负担性疾病,早期筛查、早期诊断及早期治疗是降低心理行为异常率的重要手段。既往研究提示防治越早,神经发育障碍的严重程度、致

基金项目: 北京大学健康科学中心-潍坊妇幼健康联合研究中心的研究基金(PKUWF-Y06)

作者简介: 潘彦铮(2000—),女,在读硕士研究生,主要研究方向为儿童神经发育和妇女健康。

通信作者: 计岳龙, E-mail: yuelong.ji@pku.edu.cn; 付竹梅, E-mail: fu_zm@163.com

残率及残疾程度越低^[11],进一步突显了神经发育障碍早期识别的重要性。因此,需要多学科通力协作开发出可靠的精准早筛诊断工具^[12],及早识别出神经发育障碍高危儿童,以推动及时的干预与治疗^[13]。

2 神经发育障碍筛查诊断现状

目前,神经发育障碍的筛查与诊断主要集中在两大方面:传统的临床量表评估与基于生物学机制的评估^[14]。相对于量表评估,生物学评估方法涉及基因诊断、神经影像学、神经电生理技术及实验室检查等技术手段^[15],但尚未大规模普及,同时可穿戴设备正在成为大规模医疗健康系统中疾病预防和管理的关键新兴技术^[16]。尽管国内尚未形成针对神经发育障碍统一的筛查与干预流程,但针对几类高发病率的疾病,如 ASD、ADHD、ID 或全面发育迟缓,已经有了相对应的专家共识^[17-19]以及基本的早期识别^[16,19]、筛查工具^[20-22],但是现存的诊断评估方法仍存在以下问题。

2.1 诊断稳定性低会带来恐慌和卫生服务负担

虽然在初级保健中对 ASD 等神经发育障碍进行早期筛查变得越来越普遍,并被认为是迈向早期治疗的关键一步。然而在一般儿童人群中诊断稳定性是未知的^[23]。ASD 在患儿 12~13 个月的诊断稳定性最低,为 0.50(95%CI:0.32~0.69)^[24],而不稳定和高假阳性率会带来焦虑恐慌和进一步卫生服务负担。

2.2 大部分问卷存在适用年龄限制 儿童孤独症谱系测试(The Childhood Autism Spectrum Test CAST)^[25]、ADHD 相关的困难儿童问卷调查(Questionnaire-Children with Difficulties, QCD)^[26]等量表是针对 4~18 岁儿童或其家长进行筛查和评估,无法针对年龄段更低的患儿进行评估。

2.3 依赖家长报告或儿童的现场表现 神经发育障碍的传统评估量表大多要求儿童执行特定动作或与对象互动,这一过程不仅耗时,还高度依赖于评估者的主观判断^[14],进而导致时间成本高、结果稳定性差以及漏诊率较高的问题。

2.4 人力成本高且短缺 我国儿童精神科医师资源短缺,加之儿童保健医师和全科医师在专业筛查与判别方面的培训不足,导致高水平人力资源尤为匮乏^[27]。

3 可穿戴设备概述

3.1 可穿戴设备的定义和分类 可穿戴设备是指直接贴合人体穿戴,并能连接智能手机或其它智能

终端的电子设备,可以实时监测和收集用户的生理指标^[28]。常见的穿戴模式可划分为接触式、外接式及植入式三大类。

3.2 可穿戴设备的装置组成 可穿戴设备作为人类活动识别(human activity recognition, HAR)应用的一个重要领域,其内置的轻量级惯性运动单元能够全天候记录数据,无需实验者现场干预,且以密集的采样率实时记录,展现出了巨大潜力。HAR 系统通过个人数字设备(如加速度计、陀螺仪等)进行的离散测量,对给定时间段内的人类行为进行分类^[29],擅长检测日常活动模式,如坐、走、跑等。HAR 系统能提供全面、客观的活动度量,有助于改善神经发育障碍筛查的效率和准确性^[30]。

3.3 可穿戴设备应用内容 可穿戴设备能够实现追踪关键的生理参数以进行健康监测和运动表现评估,持续监测生物标志物以管理慢性疾病,同时收集身体信息并提供刺激以实现便捷的人机交互。因此,其广泛应用涵盖了多个医疗领域,包括为糖尿病患者提供血糖管理支持、追踪阿尔茨海默病患者的安全位置、以及持续监测心脏病患者的心电活动^[31]等,确保及时干预与治疗。

4 可穿戴设备在神经发育障碍中的应用

神经发育障碍的核心病理状态广泛波及多个发展能区(包括认知功能、情绪调节及运动发育等),从而对个体的综合成长轨迹造成深远影响。同时此类障碍常导致患者在日常生活活动中可能伴随一系列复杂的攻击行为模式及情绪调控障碍,这些症状相互交织且存在波动,人力难以及时发现^[32]。可穿戴设备因其能够捕捉肉眼难以观察到的微小细节,在神经发育障碍评估与筛查的探索和尝试日益增多。

4.1 粗大运动发育 由于通过可穿戴设备观察到的儿童运动行为与儿童中枢神经系统的发育和完整性密切相关,特定年龄异常运动模式或缺乏某些运动技能可以预测或区分出患儿^[33]。早在 2016 年,一种用于早产儿评估和康复的模块化设备 CareToy 已经通过与传感器支持的系统结合使用以评估婴幼儿的粗大运动技能^[34]。通过对简单的上肢运动数据进行分析,研究者就能够区分 12~36 个月内的 ASD 高危婴儿和低危婴儿,其准确率达到 84.9%^[35]。通过比对典型发育儿童和患有神经发育障碍儿童的上肢活动数据,2018 年 Braito 等^[36]对发育障碍进行了较为可靠的定量评估。2020 年芬兰 Airaksinen 等^[37]设计了一款四肢设置多传感器的智能婴儿连身衣,用于定量跟踪婴儿运动,其精度与人类评估相当。2022 年该团队使用深度学习算

法分析运动信号,以预测婴儿运动能力的成熟度,能够实现发育迟缓的早期识别^[38],2023 年该团队继续深化使用可穿戴设备记录评估粗大运动的早期发育水平,发现在运动功能和身体数据(身高,体重,头围;单独或组合)的测量之间具有高度可比性,提示对婴儿的运动发育进行纵向和定量跟踪是可行的^[39]。

4.2 精细运动复杂性 运动复杂性对于正常的运动发育至关重要,而持续的低复杂度行为模式是 ASD 的核心诊断症状之一。Wilson 等^[40]在 2021 年利用可穿戴传感器纵向评估 ASD 高危婴儿的腿部全天运动复杂性,发现与认知能力和适应技能结果相比,运动复杂性和 ASD 结果之间的相关性更强。同年,Siddiqui 等^[41]开发了基于可穿戴传感器的手势识别系统,用于 ASD 儿童的筛查,结果实现了约 91% 的准确率。当使用可穿戴式传感器时,研究者发现最少仅需两天就能准确地反映出发育障碍风险婴儿的典型日常行为^[42],为通过可穿戴设备评价婴儿生命早期精细运动发育水平的可能性提供了初步证据^[43]。

4.3 心率测量及变异率 因为大多数 ASD 受试者难以识别和表达压力,受 ASD 和学龄前语言障碍影响的儿童应激反应的一个潜在指标就是心率测量及变异率^[44]。嵌入在腰带中的可穿戴传感器系统能够无创、无痛且客观监测患儿的心肺活动,分析心率变异性,这为评估 ASD 儿童提供了新的视角。然而这一领域目前仍需增加训练数据量提升模型表现^[45]。

4.4 攻击行为 可穿戴生物传感器和机器学习技术能够用于预测住院的 ASD 青少年患者中即将发生的攻击行为。2023 年在涉及 4 家精神科基础住院医疗中心的 70 名 ASD 青少年的预后研究中,基于可穿戴设备构建的机器模型能够在攻击行为发生前 3min 预测攻击性行为,模型性能较为理想($AUC=0.80,95\%CI:0.79\sim0.81$)^[46]。

4.5 睡眠问题 2023 年一项针对 79 名 ADHD 儿童和 68 名睡眠问题儿童的诊断性研究显示,基于昼夜节律的可穿戴数据有助于开发一个合适的机器学习模型。ADHD 患者的睡眠时间更短,白天活动强度更高,利用睡眠可穿戴设备开发的模型具有较好的诊断性能。得到的机器学习模型显示 ADHD 诊断的敏感性和特异性都较为可观($AUC=0.798$,敏感性=0.756,特异性=0.716)^[47]。

5 可穿戴设备的优势和劣势

5.1 可穿戴设备优点 可穿戴设备具有的优点包括:1)连续监测:可穿戴设备可以长时间佩戴,因此

能够延长数据收集时间,从而可以进行连续监测;2)远程监测和配合度:被试者佩戴舒适、配合度高,不易发生研究对象脱落。实验者不需要在场就可以评估婴幼儿在家庭环境中进行的全面日常活动。相比之下,临床评估通常在标准化环境中进行,限时评估且数量有限^[48];3)数据客观、容易上传:被动收集大量数据,为实现远程诊断打开了大门^[49]。

5.2 可穿戴设备的缺点 1)标准不统一:目前研究样本量小、缺乏对照组、使用的设备和参数繁多,目前因此很难得到统一的标准。2)成本问题:技术成本高,难以大规模推广。3)辅助而非取代:尽管可穿戴设备可能在未来支持诊断和管理,但它们将无法取代医疗保健专业人员及其临床观察^[49]。

6 可穿戴设备的未来发展与展望

2022 年全球可穿戴技术市场规模约为 555 亿美元,并预测到 2030 年将增长至约 1 424 亿美元^[50],由于可穿戴设备在筛查以及评估儿童神经障碍发育异常上的优势,具有广阔的发展前景^[39]。

6.1 多模态输入 除了常规的运动技能指标如婴幼儿身体位置、姿势等,未来通过与其他可穿戴设备结合,如“头戴摄像头”和录音机,可以更加全面地了解婴儿如何通过自己的行动来学习和塑造环境,这也为评估婴儿生长发育提供了新角度^[30]。

6.2 多学科交叉 可穿戴设备还可以与神经发育诊断和治疗的新技术相结合,并促进多学科交叉,以更好地达到预测和诊断的目的。这些技术主要包括生物样本检测、深度学习、功能磁共振成像、脑电图和眼动追踪等^[51]。

6.3 全球健康公平性促进 通过广泛采集来自多元文化背景下儿童群体的可穿戴设备活动数据,能够深化对正常与异常健康及成长轨迹的认知,并为优化早期干预策略提供实证基础,同时以促进全球健康公平性。例如,将危地马拉偏远地区 1 名 1 个月大的土著婴儿一整天腿部运动的试点数据与美国同一年龄段典型发育情况的婴儿进行比较后发现,后者的运动次数是前者的两倍。这一初步观察表明,由于营养不良而导致生长迟缓的婴儿睡眠时间更长和运动量更少^[52]。

儿童神经发育障碍的筛查和诊断依赖于医生的临床观察和家长的描述,容易受到经济、地区、交通、时间以及家长认知能力等多方面的限制,导致漏诊或延迟诊断,错过最佳干预期。鉴于此,迫切需要更加高效、准确和低成本的筛查工具。而可穿戴设备因其可以动态、无创的实时测量生物运动信息,提供连续、多模态的生理信息而受到广泛关注,应用前景

广泛。及时识别与干预对于提升患儿治疗结果至关重要,因此可穿戴设备在早期筛查与诊断的应用需要更多的关注与重视。

参考文献

- [1] Thapar A, Cooper M, Rutter M. Neurodevelopmental disorders[J]. *Lancet Psychiat*, 2017, 4(4): 339-346.
- [2] Solmi M, Radua J, Olivola M, et al. Age at onset of mental disorders worldwide: Large-scale Meta-analysis of 192 epidemiological studies[J]. *Mol Psychiatry*, 2022(27): 281-295.
- [3] Pierrat V, Marchand L, Marret S, et al. Neurodevelopmental outcomes at age 5 among children born preterm: EPIPAGE-2 cohort study[J]. *BMJ*, 2021(373): n741.
- [4] Jeste SS. Neurodevelopmental behavioral and cognitive disorders[J]. *Continuum*, 2015, 21(3): 690-714.
- [5] Deloitte Australia. The social and economic costs of ADHD in Australia[EB/OL]. [2024-08-01]. <https://www.deloitte.com/au/en/services/economics/perspectives/social-economic-costs-adhd-Australia.html>.
- [6] Kularatna S, Jadambaa A, Senanayake S, et al. The cost of neurodevelopmental disability: Scoping review of economic evaluation methods[J]. *ClinicoEconomics Outcomes Res*, 2022(14): 665-682.
- [7] Licari MK, Alvares GA, Varcin K, et al. Prevalence of motor difficulties in autism spectrum disorder: Analysis of a population-based cohort[J]. *Autism Res*, 2020, 13(2): 298-306.
- [8] Miller HL, Sherrod GM, Mauk JE, et al. Shared features or co-occurrence? Evaluating symptoms of developmental coordination disorder in children and adolescents with autism spectrum disorder[J]. *J Autism Dev Disord*, 2021, 51(10): 3443-3455.
- [9] Miller HL, Licari MK, Bhat A, et al. Motor problems in autism: Co-occurrence or feature? [J]. *Dev Med Child Neurol*, 2024, 66(1): 16-22.
- [10] 国家卫生健康委. 国家卫生健康委关于印发贯彻 2021-2030 年中国妇女儿童发展纲要实施方案的通知[EB/OL]. (2022-04-09)[2024-07-22]. <http://www.nhc.gov.cn/fys/s7900/202204/acaaffebf2e44964a9b14fddddd173cfa.shtml>.
- [11] 邹红, 朱健芳, 罗佳怡, 等. 孤独症谱系障碍的干预方法及发展趋势[J]. *中国儿童保健杂志*, 2024, 32(3): 317-321.
- [12] Zou H, Zhu FJ, Luo JY, et al. Intervention methods and development trends of autism spectrum disorder[J]. *Chin J Child Health Care*, 2024, 32(3): 317-321. (in Chinese)
- [13] Cainelli E, Bisiacchi P. Neurodevelopmental disorders: Past, present, and future[J]. *Children*, 2022, 10(1): 31.
- [14] Marschik PB, Pokorny FB, Peharz R, et al. A novel way to measure and predict development: A heuristic approach to facilitate the early detection of neurodevelopmental disorders[J]. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2017, 17(5): 43.
- [15] 赵晓茹, 李钦, 赵广平, 等. 神经发育障碍的早期自动化筛查技术[J]. *教育生物学杂志*, 2023, 11(3): 225-230.
- [16] Zhao XR, Li Q, Zhao GP, et al. Early automated screening technology for neurodevelopmental disorders [J]. *J Biol Educ*, 2023, 11(3): 225-230. (in Chinese)
- [17] 朱红敏, 袁纯辉, 刘智胜. 儿童神经发育障碍疾病研究进展[J]. *中国当代儿科杂志*, 2023, 25(1): 91-97.
- [18] Zhu HM, Yuan CH, Liu ZS. Research progress on neurodevelopmental disorders in children[J]. *Chin J Contemp Pediatr*, 2023, 25(1): 91-97. (in Chinese)
- [19] 彭仲康, 崔兴然, 张政波, 等. 可穿戴设备: 评估与监测人体生理状态的展望[J]. *生物医学工程杂志*, 2023, 40(6): 1045-1052.
- [20] Peng ZK, Cui XR, Zhang ZB, et al. Wearable electronic devices: A prospect for assessing and monitoring the physiological state of the human body[J]. *J Biol Eng*, 2023, 40(6): 1045-1052. (in Chinese)
- [21] 中华医学会儿科学分会发育行为学组, 中国医师协会儿科学分会儿童保健专业委员会, 儿童孤独症诊断与防治技术和标准研究项目专家组. 孤独症谱系障碍儿童早期识别筛查和早期干预专家共识[J]. *中华儿科杂志*, 2017, 55(12): 890-897.
- [22] Developmental Behavior Group of the Pediatric Branch of the Chinese Medical Association, Child Health Care Professional Committee of the Pediatric Branch of the Chinese Medical Doctor Association, Expert Group of the Diagnosis and Prevention of Autism in Children and Standards Research Project. Expert consensus on early identification, screening and early intervention in children with autism spectrum disorder[J]. *Chin J Appl Clin Pediatr*, 2017, 55(12): 890-897. (in Chinese)
- [23] 中华医学会儿科学分会神经学组, 中国医师协会神经内科学分会儿童神经疾病专业委员会. 儿童智力障碍或全面发育迟缓病因诊断策略专家共识[J]. *中华儿科杂志*, 2018, 56(11): 806-810.
- [24] Neurology Group, Pediatric Branch, Chinese Medical Association, Pediatric Neurological Disease Professional Committee, Neurology Branch, Chinese Medical Doctor Association. Expert consensus on diagnostic strategies for the etiology of intellectual disability or global developmental delay in children[J]. *Chin J Appl Clin Pediatr*, 2018, 56(11): 806-810. (in Chinese)
- [25] 中华医学会儿科学分会发育行为学组. 注意缺陷多动障碍早期识别、规范诊断和治疗的儿科专家共识[J]. *中华儿科杂志*, 2020, 58(3): 188-193.
- [26] Developmental Behavior Group Pediatric Branch Chinese Medical Association. Pediatric expert consensus on early identification, standardized diagnosis and treatment of attention deficit hyperactivity disorder[J]. *Chin J Appl Clin Pediatr*, 2020, 58(3): 188-193. (in Chinese)
- [27] Zwaigenbaum L, Bauman ML, Stone WL, et al. Early identification of autism spectrum disorder: Recommendations for practice and research[J]. *Pediatrics*, 2015, 136(Suppl): 10-40.
- [28] Han YL, Sulaiman WSW, Badayai ARA, et al. Systematic review of translation and cultural adaptations of autism spectrum disorder's screening tool: The Modified Checklist for Autism in Toddlers, Revised (M-CHAT-R) [J]. *F1000Research*, 2023(12): 471.
- [29] Li C, Zhu G, Feng J, et al. Improving the early screening procedure for autism spectrum disorder in young children: Experience from a community-based model in Shanghai[J]. *Autism Res*, 2018, 11(9): 1206-1217.
- [30] Siu AL, US Preventive Services Task Force (USPSTF), Bibbins-Domingo K, et al. Screening for autism spectrum

- disorder in young children; US preventive services task force recommendation statement[J]. *JAMA*, 2016, 315(7): 691-696.
- [24] Pierce K, Gazestani VH, Bacon E, et al. Evaluation of the diagnostic stability of the early autism spectrum disorder phenotype in the general population starting at 12 months[J]. *JAMA Pediatr*, 2019, 173(6): 578-587.
- [25] Allison C, Williams J, Scott F, et al. The Childhood Asperger Syndrome Test (CAST): Test-retest reliability in a high scoring sample[J]. *Autism*, 2007, 11(2): 173-185.
- [26] Zheng Y, Du Y, Su LY, et al. Reliability and validity of the Chinese version of Questionnaire - Children with Difficulties for Chinese children or adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder: A cross-sectional survey[J]. *Neuropsychiatr Dis Treat*, 2018(14): 2181-2190.
- [27] 黄环环, 何凡. 儿童注意缺陷多动障碍常见精神科共患病及治疗[J]. *中国实用儿科杂志*, 2023, 38(8): 588-592.
Huang HH, He F. Common psychiatric comorbidities and treatment of attention deficit hyperactivity disorder in children[J]. *Chin J Prac Pediatr*, 2023, 38(8): 588-592. (in Chinese)
- [28] 江英婵, 张勇勤, 张琦, 等. 数字健康技术在缓解围生期女性负性情绪中应用的研究进展[J]. *护理研究*, 2024, 38(17): 3087-3093.
Jiang YC, Zhang YQ, Zhang Q, et al. Research progress on the application of digital health technology in alleviating negative emotions in perinatal women[J]. *Nurs Res*, 2024, 38(17): 3087-3093. (in Chinese)
- [29] Straczekiewicz M, James P, Onnela JP. A systematic review of smartphone-based human activity recognition methods for health research[J]. *NPJ Digit*, 2021, 4(1): 1-15.
- [30] Franchak JM, Scott V, Luo C. A contactless method for measuring full-day, naturalistic motor behavior using wearable inertial sensors[J]. *Front Psychol*, 2021(12): 701343.
- [31] 王瑞, 吕蓉, 梁涛. 可穿戴设备在疾病管理中的应用进展[J]. *中华护理杂志*, 2018, 53(1): 114-116.
Wang R, Lv R, Liang T. Advances in the application of wearable devices in disease management[J]. *Chin J Nurs*, 2018, 53(1): 114-116. (in Chinese)
- [32] Ciarmoli D, Stasolla F. New technologies to support people with neurodevelopmental disorders: A selective review[J]. *OBM Neurobiol*, 2023, 7(1): 1-32.
- [33] Novak I, Morgan C, Adde L, et al. Early, accurate diagnosis and early intervention in cerebral palsy: Advances in diagnosis and treatment[J]. *JAMA Pediatr*, 2017, 171(9): 897-907.
- [34] Rihar A, Mihelj M, Pašič J, et al. Infant posture and movement analysis using a sensor-supported gym with toys[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2019, 57(2): 427-439.
- [35] Wedyan M, Al-Jumaily A. Upper limb motor coordination based early diagnosis in high risk subjects for autism[C]//2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. doi: 10.1109/SSCI.2016.7849893.
- [36] Braito I, Maselli M, Sgandurra G, et al. Assessment of upper limb use in children with typical development and neurodevelopmental disorders by inertial sensors: A systematic review[J]. *J NeuroEng Rehabil*, 2018, 15(1): 94.
- [37] Airaksinen M, Räsänen O, Ilén E, et al. Automatic posture and movement tracking of infants with wearable movement sensors[J]. *Sci Rep*, 2020(10): 169.
- [38] Airaksinen M, Gallen A, Kivi A, et al. Intelligent wearable allows out-of-the-lab tracking of developing motor abilities in infants[J]. *Commun Med*, 2022, 2(1): 1-14.
- [39] Airaksinen M, Taylor E, Gallen A, et al. Charting infants' motor development at home using a wearable system: Validation and comparison to physical growth charts[J]. *E Bio Medicine*, 2023(92): 104591.
- [40] Wilson RB, Vangala S, Elashoff D, et al. Using wearable sensor technology to measure motion complexity in infants at high familial risk for autism spectrum disorder[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 616.
- [41] Siddiqui U, Ullah F, Iqbal A, et al. Wearable-sensors-based platform for gesture recognition of autism spectrum disorder children using machine learning algorithms[J]. *Sensors*, 2021(21): 3319.
- [42] Deng W, Nishiyori R, Vanderbilt DL, et al. How many days are necessary to represent typical daily leg movement behavior for infants at risk of developmental disabilities? [J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5344.
- [43] Wilson RB, Vangala S, Reetzke R, et al. Objective measurement of movement variability using wearable sensors predicts ASD outcomes in infants at high likelihood for ASD and ADHD[J]. *Autism Res*, 2024, 17(6): 1094-1105.
- [44] Fioriello F, Maugeri A, D'Alvia L, et al. A wearable heart rate measurement device for children with autism spectrum disorder[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 18659.
- [45] Pittella E, Piuze E, Rizzuto E, et al. Wearable heart rate monitoring as stress response indicator in children with neurodevelopmental disorder[J]. *IEEE MeMeA*, 2018. doi:10.1109/MeMeA.2018.8438805.
- [46] Imbiriba T, Demirkaya A, Singh A, et al. Wearable biosensing to predict imminent aggressive behavior in psychiatric inpatient youths with autism[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(12): e2348898.
- [47] Faedda GL, Ohashi K, Hernandez M, et al. Actigraph measures discriminate pediatric bipolar disorder from attention-deficit/hyperactivity disorder and typically developing controls[J]. *JCPP*, 2016, 57(6): 706-716.
- [48] Airaksinen M, Vanhatalo S, Räsänen O. Comparison of end-to-end neural network architectures and data augmentation methods for automatic infant motility assessment using wearable sensors[J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3773.
- [49] Welch V, Wy TJ, Ligezka A, et al. Use of mobile and wearable artificial intelligence in child and adolescent psychiatry: Scoping review[J]. *J Med Int Res*, 2022, 24(3): e33560.
- [50] Chen X, Kim DH, Lu N. Introduction: Wearable devices[J]. *Chem Rev*, 2024, 124(10): 6145-6147.
- [51] Marzena SM, Micai M, Caruso A, et al. Technologies to support the diagnosis and/or treatment of neurodevelopmental disorders: A systematic review[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2023(145): 105021.
- [52] Lobo MA, Hall ML, Greenspan B, et al. Wearables for pediatric rehabilitation: How to optimally design and use products to meet the needs of users[J]. *Phys Ther*, 2019, 99(6): 647-657.