

三维运动捕获技术在儿童发育性协调障碍中的应用

张嘉佳¹, 徐纯鑫², 戴霄天¹, 沈敏², 杜雯翀³, 蔡娴颖², 花静¹

1. 同济大学附属第一妇婴保健院妇幼保健部, 上海 201204;
2. 同济大学附属养志康复医院; 3. 英国诺丁汉特伦特大学心理学院

摘要: 发育性协调障碍(DCD)是一种以运动协调能力障碍为主要表现的发育性疾病,儿童期患病率较高,可严重影响患儿的身心健康。三维运动捕获以其可精确“分析”动作细微差别的优势,被欧美国家应用于 DCD 的诊断干预,但在国内目前该技术仅主要用于脑瘫儿童的步态分析。本研究通过对国内外文献进行综述,分析三维运动捕获技术在儿童 DCD 功能评估和诊断干预应用中的研究进展,探索其超早期(婴幼儿期)诊断的可行性,为进一步实现儿童 DCD 的精准诊断提供新的思路和方法学手段。

关键词: 三维运动捕获技术; 发育性协调障碍; 运动功能; 诊断; 评估; 儿童

中图分类号:R749.94 文献标识码:A 文章编号:1008-6579(2022)03-0285-04 doi:10.11852/zgetbjzz2020-2105

Application of three-dimensional motion capture technology in children's developmental coordination disorder

ZHANG Jia-jia*, XU Chun-xin, DAI Xiao-tian, SHEN Min, DU Wen-chong, CAI Xian-ying, HUA Jing

* Shanghai First Maternity and Infant Hospital, Tongji University School of Medicine, Shanghai 201204, China

Corresponding author: HUA Jing, E-mail: jinghua@tongji.edu.cn

Abstract: Developmental Coordination Disorder (DCD) is a developmental disease with motor coordination disorder as the main manifestation. It has a high prevalence in childhood and can seriously affect the physical and mental health of children. Three-dimensional motion capture has the advantage of accurately analyzing the nuances of movements, and is used in the diagnostic intervention of DCD in European and American countries. However, this technology is currently only used for gait analysis of children with cerebral palsy in China. This study reviews the domestic and foreign literature, analyzes the research progress of 3D motion capture technology in children's DCD function evaluation and diagnostic intervention application, and explores the feasibility of its ultra-early (infant) diagnosis, so as to provide new ideas and methods for further realizing the accuracy of children's DCD diagnosis.

Keywords: three-dimensional motion capture; developmental coordination disorder; motor function; diagnostic; assessment; children

发育性协调障碍(developmental coordination disorder, DCD)是一种比较常见的神经系统发育障碍性疾病^[1],国内儿童患病率可达 5%~8%。该病与注意力缺陷多动/冲动障碍、孤独症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)等发育性疾病的共患率较高(>50%)。DCD 在早期即可存在运动发育迟缓,表现为坐、走、爬等发育里程落后于同龄婴幼儿,最新的《精神疾病诊断与统计手册》第五版(Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disor-

ders, Fifth Edition, DSM-5)将婴幼儿期运动障碍作为 DCD 诊断标准之一。然而,由于 DCD 存在症状表现“轻微”、早期症状不典型等特点,造成早期诊断困难、漏诊率高,易错过 0~3 岁干预的关键期。

运动捕获技术产生于 20 世纪 70 年代,能够测量、跟踪和记录物体在三维空间中的运动轨迹,具有无创、甄别率高、可远程监测等优势,因此在欧美国家被应用于运动障碍性诊断和干预效果评价。该技术分为直接(测量身体活动的设备,例如加速度计、

基金项目:上海市卫生健康委老龄化和妇女儿童健康研究专项(2020YJZX02131);浦东新区卫生健康委员会联合攻关项目(PW2020D-112);上海申康医院发展中心临床三年行动计划(SHDC2020CR1047B-003)

作者简介:张嘉佳(1997-),女,山东人,硕士研究生在读,研究方向为儿童保健。

通信作者:花静, E-mail: jinghua@tongji.edu.cn

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1346.R.20210806.1602.070.html

穿戴式测量仪器等)和间接(基于视觉观察,例如摄像机录制或光电传感系统)两部分配置。二者相结合,不仅可用于收集步态等大运动数据,也可以通过观察抓握、书写等动作时的上肢和手指运动特征,捕捉眼动视觉信息,分析运动计划和组织能力等多个能区,对于鉴别 DCD 儿童大运动、精细运动、运动计划和感知觉等方面的障碍,尤其是早期表现中的“细微差别”,具有重要的临床意义。

1 三维运动捕获技术应用于发育性协调障碍运动功能评估

1.1 三维运动捕获应用于发育性协调障碍精细运动评估 DCD 患者存在精细运动障碍,可表现为手部动作较笨拙,在进行抓握、书写任务时显示出障碍,日常生活中常出现系鞋带、扣纽扣困难等情况。运动捕获技术可以实现精细运动过程中动作的量化分析,为 DCD 的诊断提供参考。

有研究者利用三维(three dimension, 3D)运动捕获系统分析 DCD 患儿手抓握动作特征^[2],试验设置三个变量:物体大小、视觉和距离,受试者在不同条件下抓取红色木质圆柱体,在手腕和手指处安装追踪器记录数据。结果表明,DCD 儿童在远、近处的伸手和抓握动作都与正常发育(typically developing, TD)组特征相同,但抓取时拇指和食指距离较宽,即手张开的角度更大。此外,DCD 儿童的抓取动作更慢,对视觉的依赖性更强,变异性也更大。Wilmot 等^[3]也得出了相似结论:DCD 个体完成手部任务的持续时间和减速时间均更长;TD 组个体随着年龄的增加,所需的运动持续时间和减速时间都会减少,DCD 个体却未显现随年龄增加而减少的趋势。

运动技术与数字化手写板联合应用可以分析书写运动过程,通过捕获传输笔在其表面书写时产生的压力程度信息以及手写移动时的时空数据^[4]。DCD 患儿可表现为书写能力障碍,有研究运用数字化手写板评估 8~14 岁 DCD 儿童的视知觉和视觉-运动整合能力^[5]。受试者完成视觉运动整合能力测试(test of visual motor integration, VMI)和视知觉测试(test of visual perceptual skills, TVPS),并在数字化手写板上完成书写任务。分析结果显示,DCD 组在视知觉、视觉-运动整合以及手写表现方面的得分都比 TD 组差。

1.2 三维运动捕获应用于发育性协调障碍大运动评估 步态是体现人体动作协调性的关键特征之

一。近年来,很多学者采用运动捕获的方法对 DCD 儿童步态等异常运动模式进行评估,精准客观地评估步态参数,为 DCD 儿童大运动障碍的临床诊断提供可靠的依据。

在运动期间,身体左右侧之间的对称性是调整步态周期和效率的关键。一项研究用三维运动捕获系统对受试者行走 1 min 的步态进行跟踪,测量其步长、步速等步态参数,计算步长和摆动相时间的对称比(对称比结果 >1 ,且越接近 1 对称性越好)^[6]。结果显示运动参数的变异程度与步态不对称程度之间存在关系,且 DCD 患儿步态不对称的情况会随着年龄增长而降低,但仍难以达到与正常个体相似的水平。

DCD 患儿沿着不规则地形行走时存在特殊表现^[7]。Gentle 等^[7]使不同年龄组受试者分别在 6 m 的水平和不规则的两种地形上步行 2 min,用 3D 运动捕获分析系统提取足部位置、头部和躯干的速度和角度值。分析结果得出,虽然各组步态均会适应不规则地形,但与正常对照组相比,DCD 组受影响较大:步速明显更慢、步幅更短、步宽增加。除了步态特征外,头部向地面倾斜度更大,视角更加偏向地面,提示 DCD 儿童在完成具有一定难度的动作(不规则地形)时,对视觉信息的依赖性更大。

1.3 三维运动捕获在评估发育性协调障碍运动计划能力中的应用 运动计划能力障碍是 DCD 发生发展的重要机制之一,分为对即刻要发生的事情的“计划能力”,以及对后续任务需求的计划能力^[8]。运动计划为障碍生成有效的补偿策略提供思路,以应对由于运动想象、执行功能、感知旋转跨度(perceived rotation span)以及年龄因素而产生的运动速度和准确性等方面的限制^[9]。

通过不同试验范式,分析患儿在精细运动中计划能力是最为传统的评估方法之一。Bhoyroo 等^[10]通过终极舒适状态(end-start-comfort, ESC)试验模式来完成儿童运动计划能力的评估,ESC 是运动计划能力的经典衡量标准,即受试者选择一个不舒适的动作开始位置,不断调整达到完全舒适的动作位置。8~12 岁的受试儿童分别完成了 3 项简单任务(抓握木棒、插剑入盒、木棒运输)和一项复杂任务(八边形任务),用摄像机录制过程并分析数据。结果得出 DCD 儿童执行 ESC 的能力随着任务复杂性的提高而下降,但有一定使用运动想象(motor imagery, MI)改善运动规划策略的能力^[11]。

有研究用 3D 运动捕获系统测试儿童抓握试验中的动作预测能力,分析 DCD 患者接受预测信息后的组织运动计划功能^[12]。试验任务是受试者抓握

点亮的目标物,分为静态和动态两种试验范式。在静态条件下给出完全线索(直接指出哪个目标物会亮)和不完全线索(指出多个目标物中会有一个被点亮)。结果发现,TD 组可以利用拥有完整或部分线索的静态以及动态预测信息进行运动计划,而 DCD 组只有在提供完全线索的静态条件下才能完成良好的运动计划行为,在动态条件难以使用预先给定的信息来规划运动。因此,DCD 儿童计划能力缺陷往往表现在具有难度的运动中,而完成简单运动时与 TD 儿童相近。

2 三维运动捕获技术在发育性协调障碍患儿感知觉评估中的应用

在完成较复杂的精细运动和大运动时,DCD 儿童可能更依赖于视觉信息。Johnny 等^[13]让受试者从非惯用脚开始沿着 7 m 的路径行走,准确地步入目标区域并越过障碍物,最后到达路线终点。过程中同时捕获眼动信息和评测受试者的焦虑状态。结果显示与 TD 儿童相比,DCD 儿童将脚放入目标区域中时,脚放置处的误差和变异性更大,脚更容易与目标区域边缘接触。在即将接近目标区域时,DCD 组的步长和步宽也表现出更大的可变性。这项研究结果表明,脚部位置的定位缺陷可能是导致 DCD 患儿跌倒发生率增加的原因之一,可能是 DCD 儿童视觉觉信息加工能力不足导致的。

在日常生活中穿过狭窄的缝隙(如通过门间缝隙),需要对缝隙大小进行感知觉判断,DCD 儿童可能会由于视觉感知能力低下而导致运动障碍。一项研究考虑了在视觉观察和穿越缝隙时 DCD 儿童的知觉判断和运动行为,对受试者进行了两项调查^[14]。第一项为感知任务,让受试儿童对缝隙的可通过大小进行判断,DCD 组儿童判断的决策临界比(即参与者刚好从不转动到转动肩膀以安全通过缝隙时,缝隙与肩膀的比值)比 TD 组更小,即 DCD 儿童可能低估了他们安全通过所需的空间大小。第二项为行动任务,用运动捕捉系统获取在穿越相同大小缝隙时的数据,DCD 组的临界比率比 TD 儿童明显增大,即可能高估了通过缝隙时所需的空间大小。该结果表明 DCD 儿童在动静态环境下的感知不同,感知觉偏差会造成行动障碍。

3 三维运动捕获技术在发育性协调障碍鉴别诊断中的应用

由于 DCD 等发育性疾病存在高度共患的可能,通过步态分析结合筛查评估问卷^[15]开展 DCD 并发

病的鉴别诊断正逐步成为研究热点,如 ASD、脑瘫等。有研究将受试者分为 ASD 组、DCD 组、ASD&DCD 共病组和 TD 组,使用运动捕获系统测定各组儿童的步态参数,结果显示:与 TD 组相比,其他各组步长都明显更短,而单纯 ASD 和 DCD 组与 TD 组的步宽无显著差异,只有 ASD&DCD 共病组的步宽明显增大,步宽作为代偿模式增加其步行的稳定性^[16],说明 ASD&DCD 共病患者存在较弱的核心力量、稳定性和平衡感。此外儿童 ASD 与 DCD 共患病时,“外八”倾向更为明显,此前有学者对单纯 ASD 患儿进行过该研究,并未发现显著差异^[17],因此这种差异可能是由于并发的 DCD 所致,而在共病条件下会加剧运动障碍的程度。

三维步态分析还可以用于 DCD 与其他运动障碍性疾病的鉴别诊断。如早发型共济失调(early-onset ataxia, EOA)和 DCD 症状之间存在相似性,Mannini 等^[18]将传感器装置在 DCD 和 EOA 儿童的腿部和腰部,通过收集步态特征数据建立与年龄相匹配的鉴别特征,构建自动鉴别(DCD 和 EOA)模式。研究也对自动鉴别模式的准确性进行了评估,其灵敏度达 78.4%,略好于 2 名儿科医生通过步态参数进行的评估(灵敏度达 73.0%)。该结果表明,采用传感器收集步态特征并结合自动分类模式,可作为 EOA 和 DCD 快速鉴别的辅助手段。

4 三维运动捕获技术在发育性协调障碍预测和超早期诊断中的应用展望

婴幼儿期是出生后神经系统发育最快的时期,因此也是神经系统功能表现最不稳定的一个时期,使 DCD 等神经行为疾病在婴幼儿期难以确诊。而 3D 运动捕获模式可精确描绘婴幼儿动作发生发展的细微差别,较之传统的神经行为测试检查更可能实现 DCD 早期诊断。

一项研究使用压力床垫以及装置在躯干及手臂上的传感器来获取运动数据以评估新生儿的运动能力^[19]。结果表明,该系统可准确捕获和评估婴儿躯干姿势和手臂运动,且操作简便,不需要复杂的设备调试和场地布置,在婴幼儿的运动研究中有良好的应用效果。Airaksinen 等^[20]为了早期识别并干预神经发育障碍(如脑瘫、ASD)的婴儿,也开发了同样为可穿戴式的多传感器智能连体衣进行运动捕获。该研究用连体衣记录婴儿的游戏过程,跟踪婴儿活动的关键姿势和移动方式,分析数据以得到用于自动鉴别疾病的量化标准,对于婴儿运动障碍具有较高的鉴别效度,为早期的诊断干预提供了更高效可

行的方法和思路。

但可穿戴式运动捕获系统获得的数据会由于照料者的日常活动而产生偏差^[21]。Zhou 等^[21]评估显示照料者本身的活动特征可对婴儿腿部运动所收集数据造成影响。应对婴儿活动数据的影响因素进行特征化排除,从而进一步增加婴幼儿期运动捕获结果的精度。

此外,由于婴幼儿的运动环境和范围较为局限,并且容易受到陌生环境的干扰。实现 DCD 等神经发育障碍疾病的“超早期”诊断,除了进一步发展 3D 运动捕获技术外,结合虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)为婴幼儿提供更为优化和可操作的运动环境,也成为实现 DCD 早期诊断的重要突破口。已有学者开始利用虚拟场景提升神经行为测试的有效性,Oagaz 等^[22]利用 VR 技术开发出一个受控的虚拟棒球场场景,结合 3D 运动捕获系统,捕捉健康受试者试图接住棒球的全身运动过程并传输数据。该工具能够用来捕捉和评估受试者的客观行为,避免了通过传统问卷方式测试时可能产生的主观因素影响,使神经行为认知功能测试结果更具有准确性。对于婴幼儿,也可以利用可穿戴式 3D 运动捕获技术与 VR、AR 等技术结合,使测试可以在家中或熟悉的虚拟家庭场景中进行,可克服在医院陌生环境中施测所带来的弊端,实时精确“描绘”婴幼儿运动时的关节活动、肌肉力量和运动计划能力等细微动作,使 DCD 超早期评估诊断成为可能。

综上所述,DCD 是神经行为障碍的一种典型疾病,我国儿童 DCD 患病率较高,有必要开展大规模的筛查和诊断。运动捕获技术是 DCD 重要的辅助诊断方法,尤其与 VR、AR 等技术结合在 DCD 超早期诊断中的应用有利于突破瓶颈,实现 DCD 的早期干预。然而目前国内应用运动捕获进行 DCD 诊断的研究仍处于空白阶段,需要儿童保健和康复领域学者进一步开展应用性研究。

参考文献

- [1] Starker L, Howie E, Smith A, et al. A crossover randomised and controlled trial of the impact of active video games on motor coordination and perceptions of physical ability in children at risk of developmental coordination disorder[J]. Hum Mov Sci, 2015, 42:146-160.
- [2] Biancotto M, Skabar A, Bulgheroni M, et al. Neuromotor deficits in developmental coordination disorder: Evidence from a reach-to-grasp task[J]. Res Dev Disabil, 2011, 32(4):1293-1300.
- [3] Wilmot K, Byrne M, Barnett AL. Reaching to throw com-

pared to reaching to place: A comparison across individuals with and without developmental coordination disorder[J]. Res Dev Disabil, 2013, 34(1):174-182.

- [4] Colyer SL, Evans M, Cosker DP, et al. A review of the evolution of vision-based motion analysis and the integration of advanced computer vision methods towards developing a markerless system[J]. Sports Med Open, 2018, 4(4):24.
- [5] Prunty M, Barnett AL, Wilmot K, et al. Visual perceptual and handwriting skills in children with developmental coordination disorder[J]. Hum Mov Sci, 2016, 49:54-65.
- [6] Wilmot K, Gentle J, Barnett AL. Gait symmetry in individuals with and without developmental coordination disorder [J]. Res Dev Disabil, 2017, 60:107-114.
- [7] Gentle J, Barnett AL, Wilmot K. Adaptations to walking on an uneven terrain for individuals with and without developmental coordination disorder[J]. Hum Mov Sci, 2016, 49: 346-353.
- [8] Wilmot K, Shan Wang S. The "why" of reaching: Second-order planning across the adult lifespan[J]. Psychol Aging, 2019, 4(3):431-440.
- [9] Wang S, Williams J, Wilmot K. Constraints on motor planning across the life span: Physical, cognitive, and motor factors[J]. Psychol Aging, 2020, 35(3):421-433.
- [10] Bhojroo R, Hands BP, Wilmot K, et al. Investigating motor planning in children with DCD: Evidence from simple and complex grip-selection tasks[J]. Hum Mov Sci, 2018, 61:42-51.
- [11] Bhojroo R, Hands BP, Wilmot K, et al. Motor planning with and without motor imagery in children with developmental coordination disorder [J]. Acta Psychol (Amst), 2019, 199:102902.
- [12] Wilmot K, Wann J. The use of predictive information is impaired in the actions of children and young adults with developmental coordination disorder [J]. Exp Brain Res, 2018, 191:403-418.
- [13] Johnny VVP, Richard JF, Greg W, et al. Children with developmental coordination disorder exhibit greater stepping error despite similar gaze patterns and state anxiety levels to their typically developing peers[J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14:303.
- [14] Wilmot K, Du W, Barnett AL. Navigating through apertures: Perceptual judgements and actions of children with developmental coordination disorder[J]. Dev Sci, 2016, 20(6):e12462.
- [15] Hsu LY, Jirikovic T, Ciol MA, et al. Motor planning and gait coordination assessments for children with developmental coordination disorder [J]. Phys Occup Ther Pediatr, 2018, 38(5):562-574.
- [16] Kindregan D. Movement patterns and physical activity in children with neurodevelopmental disorders [D]. Dublin: University of Dublin, 2017.

(下转第 296 页)