

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2025.05.015

· 应用研究 ·

基于矢量编码技术痉挛型脑性瘫痪儿童平地行走时的下肢协调性和变异性特征

陈传艺¹, 齐刘心¹, 李爱华², 倪燕², 孙威¹, 王疆娜¹

1. 山东体育学院, 山东济南市 250102; 2. 济南医院, 山东济南市 250013

通信作者: 王疆娜, E-mail: tsjywjn2018@126.com

基金项目: 1. 国家自然科学基金项目 (No. 12402373); 2. 山东省自然科学基金项目 (No. ZR2024MH341)

摘要

目的 采用矢量编码技术量化观察痉挛型脑瘫儿童在平地行走时的下肢协调性和协调变异性。

方法 2023 年 9 月至 12 月, 在济南市康复医院和济南市特殊教育学校选取痉挛型脑瘫儿童 8 例(脑瘫组), 社区不定向选取健康儿童 8 例(对照组), 以 0.45 m/s 的速度在跑步机上行走。采用 Vicon 三维动作捕捉系统采集下肢运动学数据, 通过矢量编码技术量化患侧下肢关节间的时间和空间参数, 计算关节间耦合角和耦合角变异性(CAV)。

结果 脑瘫组髋-膝关节耦合角在第一双支撑期和第二双支撑期大于对照组($|t| > 2.317, P < 0.05$); 摆动期, 髋-踝和膝-踝耦合角大于对照组($|t| > 2.346, P < 0.05$)。髋-膝、髋-踝 CAV 均在第一双支撑期、单支撑期大于对照组($|t| > 2.454, P < 0.05$), 在摆动期小于对照组($t > 2.560, P < 0.05$); 膝-踝关节 CAV 在第二双支撑期、摆动期均大于对照组($|t| > 2.909, P < 0.05$)。

结论 痉挛型脑瘫儿童行走时髋、膝、踝关节间在支撑期和摆动期均表现出更差的协调性, 在支撑期表现出更大的变异性。

关键词 痉挛型脑性瘫痪; 步态; 协调性; 矢量编码

Lower limb coordination and variability in children with spastic cerebral palsy during flat ground walking: a vector coding technique study

CHEN Chuanyi¹, QI Liuxin¹, LI Aihua², NI Yan², SUN Wei¹, WANG Jiangna¹

1. Shandong Sport University, Ji'nan, Shandong 250102, China; 2. Ji'nan Hospital, Ji'nan, Shandong 250013, China

Correspondence to WANG Jiangna, E-mail: tsjywjn2018@126.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12402373) and Shandong Natural Science Foundation (No. ZR2024MH341)

Abstract

Objective To quantify the lower limb coordination and coordination variability of children with spastic cerebral palsy (CP) during flat ground walking using vector coding technology.

Methods From September to December, 2023, eight children with spastic CP (patients) from Ji'nan Rehabilitation Hospital and Ji'nan Special Education School, and eight healthy children (controls) from communities walked on a treadmill at a speed of 0.45 m/s. Lower limb kinematic data were collected using Vicon, a three-dimensional motion capture system. Vector coding technology was used to quantify the temporal and spatial parameters of ipsilateral lower limb joints to calculate joint coupling angles and coupling angle variability (CAV).

Results In the first and second double support phase, the hip-knee coupling angle was significantly larger in the patients than in the controls ($|t| > 2.317, P < 0.05$). In the swing phase, the hip-ankle and knee-ankle coupling angles were significantly larger in the patients ($|t| > 2.346, P < 0.05$). In the first double support phase and the single support

作者简介: 陈传艺(1998-), 男, 汉族, 山东济南市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 运动生物力学。通信作者: 王疆娜(1986-), 女, 汉族, 山东潍坊市人, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 特殊人群运动与健康促进。

phase, CAV of the hip-knee and hip-ankle were significantly larger in the patients ($|t| > 2.454, P < 0.05$), and they were smaller in the swing phase ($t > 2.560, P < 0.05$). In the second double support phase and the swing phase, CAV of the knee-ankle was significantly larger in the patients ($|t| > 2.909, P < 0.05$).

Conclusion Coordination among hip, knee and ankle joints is poor for children with spastic CP during both the stance and swing phases of walking, and variability is more during the stance phase.

Keywords: spastic cerebral palsy; gait; coordination; vector coding

[中图分类号] R742.3 [文献标识码] A [文章编号] 1006-9771(2025)05-0613-08

[本文著录格式] 陈传艺, 齐刘心, 李爱华, 等. 基于矢量编码技术痉挛型脑性瘫痪儿童平地行走时的下肢协调性和变异性特征[J]. 中国康复理论与实践, 2025, 31(5): 613-620.

CITED AS: CHEN Chuanyi, QI Liuxin, LI Aihua, et al. Lower limb coordination and variability in children with spastic cerebral palsy during flat ground walking: a vector coding technique study [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2025, 31(5): 613-620.

0 引言

脑瘫是指一组持续存在的中枢性运动和姿势发育障碍的症候群, 是由于发育中胎儿或婴幼儿脑部受到非进行性损伤而引起的, 在婴幼儿中的患病率约 2.0%~3.5%^[1]。痉挛型脑瘫是常见的脑瘫类型, 主要表现为单侧肢体运动功能障碍和感觉障碍^[2]。运动控制障碍是脑瘫儿童的重要临床表现^[3], 与健康儿童相比, 脑瘫儿童平地行走功能下降^[4]。由于患侧肌痉挛, 表现为髋、膝关节屈曲异常^[5]、尖足等异常姿势^[6], 主动肌和拮抗肌的激活和收缩明显异常^[7]等。

下肢协调性和协调变异性研究能够为脑瘫儿童平地行走的运动控制提供精确数据支持^[8]。协调变异性是指机体在运动时表现出的协调模式范围^[9]。此前对平地行走的研究主要针对不同运动场景下单个关节的基本运动学参数^[10], 且集中于时间轴上运动协调特征^[11], 缺乏空间轴参数信息, 无法量化多关节耦合协调控制特征^[9]。

矢量编码技术是一种量化多关节耦合运动协调性的时空测量方法, 应用角-角图量化两关节间随时间推移运动协调模式的变化, 即关节间的耦合关系^[12], 有助于精准量化肢体间运动协调模式^[13]。目前, 基于矢量编码技术的研究多集中于脑卒中偏瘫患者的下肢步态协调性分析^[14-15]。

本研究采用矢量编码技术, 探讨脑瘫儿童与健康儿童下肢协调性和协调变异性的差异。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2023 年 9 月至 12 月, 在济南市康复医院和济南市特殊教育学校选取痉挛型脑瘫儿童 8 例作为脑瘫组。

其中, 左侧痉挛型偏瘫 5 例, 痉挛型双瘫且左侧严重 3 例。

脑瘫组纳入标准^[16]: ①痉挛型脑瘫; ②年龄 12~18 岁; ③下肢改良 Ashworth 量表分级 < 2 级; ④粗大运动功能分级系统(gross motor function classification system, GMFCS)分级 I~II 级; ⑤能够理解并执行任务指令。

根据脑瘫组的性别、年龄、身高、体质量等特征在济南市社区不定向招募匹配的健康儿童 8 例作为对照组。

对照组纳入标准^[17]: ①年龄 12~18 岁; ②无发育落后史, 未患有影响步行的其他神经系统疾病; ③双下肢无明显的异常姿势, 如 X 型腿、足外翻等; ④能够理解并遵循执行重复任务的说明。

两组排除标准^[16]: ①除脑瘫以外, 患有任何会影响其短期内保持注意力或重复移动身体能力的疾病; ②在测试前 6 个月内接受过外科手术或其他重要治疗; ③测试前 6 个月内注射肉毒杆菌毒素。

脑瘫组的痉挛程度及分型由三级甲等医院专业康复治疗师依据《中国脑性瘫痪康复指南(2022)》^[18]并结合下肢改良 Ashworth 痉挛量表的评估结果确定。GMFCS I 级 6 例, II 级 2 例。Berg 平衡量表(Berg Balance Scale, BBS)评分 > 41 分, 平均(47.63±7.74)分, 具备完成步行测试的能力。

两组性别、年龄、身高、体质量无显著性差异($P > 0.05$)。见表 1。

本研究经山东体育学院运动科学伦理委员会的批准(No. 2023014)。受试者熟悉测试流程和相关要求, 签署知情同意书。

表 1 两组基线资料比较

Table 1 Comparison of baseline data between two groups

项目	对照组($n=8$)	脑瘫组($n=8$)	t 值	P 值
性别(男/女)/ n	5/3	5/3	-	-
年龄/岁	13.75±1.49	13.88±1.25	0.182	0.858
身高/m	1.57±0.08	1.55±0.08	-0.491	0.631
体质量/kg	49.38±6.39	45.50±5.04	-1.346	0.200

1.2 方法

受试者穿着统一的测试服装(紧身上衣、短裤和标准鞋)。参考 Helen Hayes 模型^[19], 在其下肢体表解剖标志处粘贴 33 个直径 14 mm 红外反光标记点, 分别为左/右髂嵴最高点、左/右髂前上棘、 $L_{4,5}$ 中点、左/右大腿追踪点 3 个、左/右股骨外上髁、左/右股骨内上髁、左/右小腿追踪点 3 个、左/右外踝、左/右内踝、左/右第一跖骨底、左/右第五跖骨底、左/右足跟、左/右第二三跖趾关节中点。由同一名专业人员完成粘贴。

受试者在跑步机上以 0.45 m/s 的速度行走 30 s; 共 3 次, 之间站立静息 30 s。行走速度通过 Froude 数得出^[20]。动态相似理论认为^[21], 用相同的 Froude 数归一化速度行走, 不管人体体型大小, 均会以动态相似的方式进行运动。

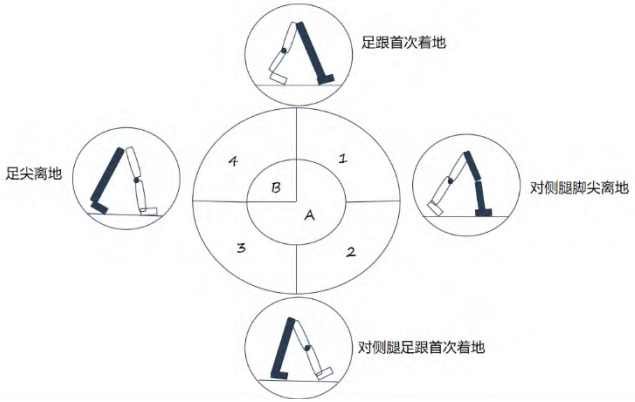
使用 Vicon 三维红外运动捕捉系统(英国 OXFORD METRICS 公司)采集运动学数据, 采集频率 100 Hz^[22]。

1.3 数据处理

由于脑瘫组肢体运动受累不对称^[23], 本研究分析严重侧(左侧)肢体髋-膝、髋-踝、膝-踝关节的协调性^[24]。一个完整的步态周期定义为左足跟着地至该足跟再次着地的阶段。本研究将步态周期划分为单支撑阶段、双支撑阶段和摆动阶段(图 1)。

Vicon 采集的运动学数据预处理后, 导入 Visual 3D-3 软件(美国 C-MOTION 公司), Butterworth 低通滤波平滑, 截止频率 10 Hz^[22]。运动学数据进行标准化处理。计算受试者行走任务开始 10 s 后 5 个连续步态的下肢髋、膝、踝关节三维关节角, 对照组取左侧下肢运动学数匹配。

受试者行走运动学角度变化主要发生在矢状面, 因此本研究主要分析左侧下肢关节在矢状面运动的数据。采用改进的向量编码技术计算耦合角和耦合角变异性(coupling angle variability, CAV)^[25]。髋-膝、髋-踝和膝-踝关节的耦合角和 CAV 的计算过程如下^[12]:



注: 1. 第一双支撑相; 2. 单支撑相; 3. 第二双支撑相; 4. 摆动相; A. 支撑期; B. 摆动期; 阴影侧为测试侧。

图 1 步态周期划分示意图

Figure 1 Schematic diagram of gait cycle phases

i 代表完整步态周期内的某个数据点, 根据连续近端(P)环节角和连续远端(D)环节角计算耦合角 γ_i 。

$$\gamma_i = \arctan\left(\frac{\theta_{D(i+1)} - \theta_{D(i)}}{\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)}}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

$$\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)} > 0$$
$$\gamma_i = \arctan\left(\frac{\theta_{D(i+1)} - \theta_{D(i)}}{\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)}}\right) \times \frac{180}{\pi} + 180 \quad (2)$$

$$\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)} < 0$$

通过下式将 γ_i 校正至 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间:

$$\gamma_i = \begin{cases} \gamma_i + 360, & \gamma_i < 0 \\ \gamma_i, & \gamma_i \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

CAV 计算^[26]:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \gamma_i \quad (4)$$

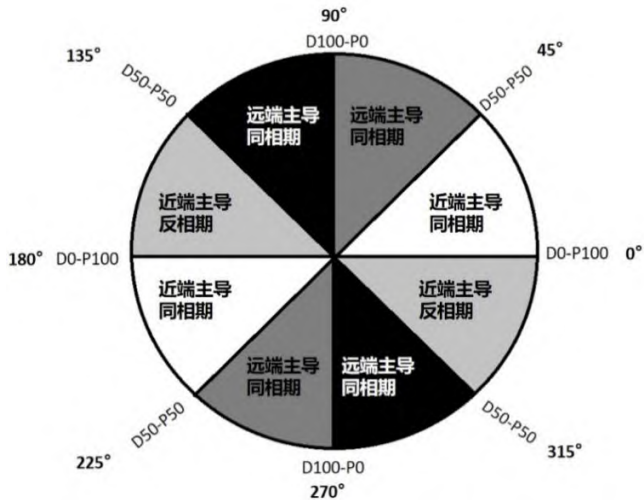
$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \gamma_i \quad (5)$$

$$R_i = \sqrt{\bar{x}_i^2 + \bar{y}_i^2} \quad (6)$$

$$CAV_i = \sqrt{2(1 - \bar{R}_i)} \times \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

其中, $\bar{x}_i$ 为平均水平向量; $\bar{y}_i$ 为平均垂直向量。

基于耦合角在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 极图上的位置, 可以将此耦合角对应的时刻定义为某一特定协调模式。采用 Needham 等^[27] 提出的改进协调模式分类方法, 见图 2^[12]。



注: D 表示远端 (Distal), P 表示近端 (Proximal); D10-P90 表示远端在运动中占有 10% 支配, 近端在运动中占有 90% 支配。以此类推。

图 2 协调模式分类
Figure 2 Coordination mode classification

1.4 统计学分析

采用 SPSS 26.0 进行统计学分析。计量资料采用 Shapiro Wilk 进行正态分布检验, 均符合正态分布, 以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示。组间比较采用独立样本 t 检验。显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

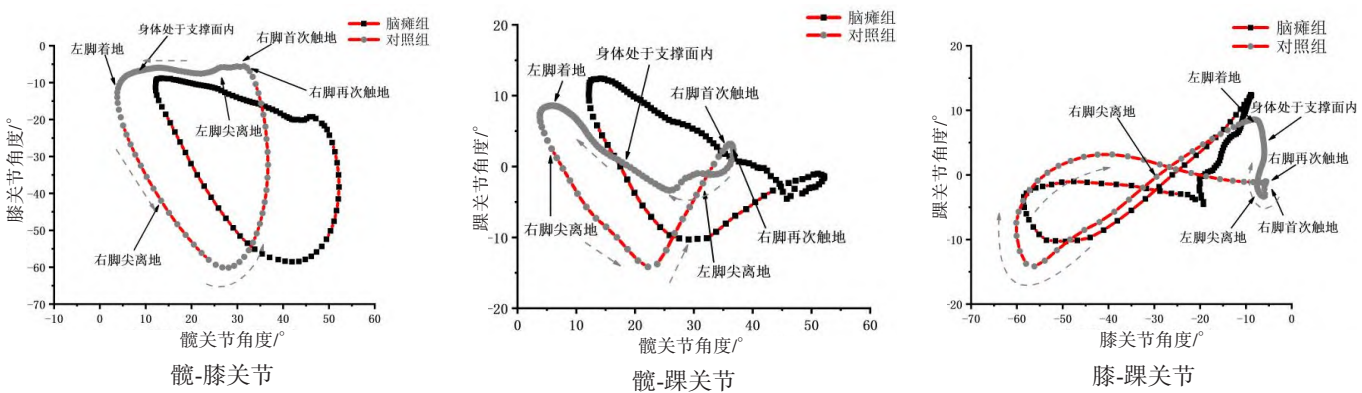


图 3 矢状面内步态周期角-角图
Figure 3 Angle-angle diagram of gait cycle in sagittal plane

2 结果

2.1 协调性

脑瘫组的步态协调模式与对照组不同(图 3)。第一双支撑期和第二双支撑期, 脑瘫组髌-膝关节耦合角均大于对照组 ($P < 0.05$)。见表 2。

摆动期, 脑瘫组髌-踝关节耦合角和膝-踝关节耦合角均大于对照组 ($P < 0.05$)。见表 3、表 4。

2.2 协调变异性

髌-膝、髌-踝 CAV 均在第一双支撑期、单支撑期大于对照组 ($P < 0.05$), 在摆动期小于对照组 ($P < 0.05$)。见表 5、表 6。

膝-踝关节 CAV 在第二双支撑期、摆动期大于对照组 ($P < 0.05$)。见表 7。

3 讨论

本研究显示, 相较于健康儿童, 脑瘫儿童步行中下肢关节耦合角较大, 部分 CAV 较大。

在第一双支撑期, 两组髌-膝关节均为近端主导同相期, 脑瘫组耦合角更大。腓绳肌痉挛和站立时膝关节外旋是导致脑瘫患者步态僵硬的两个主要因素^[28]。伸膝肌群痉挛与步态障碍之间的相关性可能是导致这一现象的原因^[29]。脑瘫儿童需要通过近端环节的适应性变化完成行走过程。

在第二双支撑期, 脑瘫组髌-膝关节属于远端主导反相期, 而对照组属于远端主导同相期, 脑瘫组耦合角更大。痉挛型脑瘫儿童下肢髌-膝关节协调性差, 可能因为脑瘫儿童肌肉激活能力减退, 导致主动收缩力弱和动作迟缓^[30], 痉挛型脑瘫儿童在平地行走中会使用更谨慎的步态策略。

表 2 两组髋-膝关节耦合角比较

Table 2 Comparison of hip-knee coupling angles between two groups

单位:°

分期	组别	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
第一双支撑期	对照组	8	180.39±0.60	-2.606	0.021
	脑瘫组	8	194.72±15.50		
单支撑期	对照组	8	183.13±8.80	0.092	0.928
	脑瘫组	8	182.83±3.15		
第二双支撑期	对照组	8	262.57±27.29	-2.317	0.036
	脑瘫组	8	294.79±28.31		
摆动期	对照组	8	163.03±21.66	-0.929	0.369
	脑瘫组	8	174.21±26.27		

表 3 两组髋-踝关节耦合角比较

Table 3 Comparison of hip-ankle coupling angle between two groups

单位:°

分期	组别	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
第一双支撑期	对照组	8	179.94±0.45	0.610	0.550
	脑瘫组	8	176.25±17.10		
单支撑期	对照组	8	176.71±9.11	-0.627	0.545
	脑瘫组	8	178.91±3.93		
第二双支撑期	对照组	8	264.76±25.80	-0.691	0.503
	脑瘫组	8	276.82±42.17		
摆动期	对照组	8	140.64±21.23	-2.346	0.037
	脑瘫组	8	161.81±14.15		

表 4 两组膝-踝关节耦合角比较

Table 4 Comparison of knee-ankle coupling angles between two groups

单位:°

分期	组别	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
第一双支撑期	对照组	8	178.77±37.47	11.698	0.255
	脑瘫组	8	148.73±60.35		
单支撑期	对照组	8	117.58±22.71	0.032	0.975
	脑瘫组	8	116.98±47.73		
第二双支撑期	对照组	8	179.88±9.18	0.204	0.844
	脑瘫组	8	176.63±44.06		
摆动期	对照组	8	162.24±15.04	-2.730	0.017
	脑瘫组	8	181.00±12.32		

在摆动期, 两组髋-踝关节属于近端主导反相期, 脑瘫组耦合角更大。既往研究显示, 在摆动期, 痉挛型脑瘫患者下肢髋-踝关节分离运动减少, 肢体协调模式主要保持在同相模式^[31]。本研究与之不同。推测可能因为痉挛型脑瘫儿童近端主导相协调模式频率较高, 可能与减少摆动期时间, 以增强整体身体稳定性有关^[32]。

在摆动期, 脑瘫组膝-踝关节属于近端主导同相期, 而对照组属于近端主导反相期, 脑瘫组耦合角更

大。由于膝关节屈曲运动减少, 脑瘫患者患侧肢体同相协调模式出现的频率更高^[8,15]。摆动期是一个潜在的不稳定期^[33], 当摆动肢体向前推进时, 脑瘫儿童的平衡稳定需要对侧肢体支撑。

下肢关节协调变异性是指在多次重复特定任务时, 下肢关节运动的变异程度, 反映下肢神经肌肉系统对不可预测外界刺激和压力的适应能力^[34]。本研究显示, 与健康儿童相比, 痉挛型脑瘫儿童行走时, 下肢关节间运动控制有更大的变异性。

表 5 两组髌-膝关节 CAV 比较
Table 5 Comparison of CAV of hip-knee coupling angles between two groups 单位:°

分期	组别	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
第一双支撑期	对照组	8	10.99±2.08	-6.717	< 0.001
	脑瘫组	8	35.45±14.49		
单支撑期	对照组	8	0.72±0.25	-2.454	0.028
	脑瘫组	8	11.65±12.59		
第二双支撑期	对照组	8	67.24±6.31	1.426	0.180
	脑瘫组	8	58.77±8.15		
摆动期	对照组	8	66.34±7.46	2.560	0.019
	脑瘫组	8	52.46±14.03		

表 6 两组髌-踝关节 CAV 比较
Table 6 Comparison of CAV of hip-ankle coupling angles between two groups 单位:°

分期	组别	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
第一双支撑期	对照组	8	0.87±0.37	-6.832	< 0.001
	脑瘫组	8	35.41±14.29		
单支撑期	对照组	8	0.99±0.45	-2.205	0.045
	脑瘫组	8	11.07±12.93		
第二双支撑期	对照组	8	68.15±6.87	1.805	0.098
	脑瘫组	8	59.35±11.95		
摆动期	对照组	8	66.62±5.08	2.720	0.022
	脑瘫组	8	54.47±11.57		

表 7 两组膝-踝关节 CAV 比较
Table 7 Comparison of CAV of knee-ankle coupling angles between two groups 单位:°

分期	组别	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
第一双支撑期	对照组	8	65.83±4.74	1.187	0.258
	脑瘫组	8	62.25±7.10		
单支撑期	对照组	8	67.30±8.74	9.151	0.233
	脑瘫组	8	58.49±10.63		
第二双支撑期	对照组	8	28.98±4.71	-4.331	0.002
	脑瘫组	8	46.32±10.3		
摆动期	对照组	8	61.37±8.41	-2.909	0.015
	脑瘫组	8	71.10±4.35		

本研究显示,脑瘫组髌-膝关节在第一双支撑期和单支撑期变异性更大,摆动期变异性降低。此前研究显示,脑瘫儿童髌关节和膝关节在步态周期中的协调动作(即同相协调)表现出较小变异性,这与他们在进行特定运动时控制肌肉选择性激活的能力降低有关^[35]。脑瘫儿童与健康儿童协调变异性的差异与脑瘫儿童在直行过程中挛缩引起的踝关节运动减少有关^[24]。

本研究显示,脑瘫组髌-踝协调变异性在第一双

支撑期和单支撑期更大,摆动期的变异性较小。Sukal-Moulton 等^[36]发现,与健康儿童相比,偏瘫儿童下肢髌-踝关节的同相协调出现频率更高,髌-踝关节变异性更小。偏瘫儿童比健康同龄人的运动行为灵活性和适应性差^[37],这与他们采取更谨慎的步态模式(同相运动模式)一致。在步态周期不同阶段,踝关节位置和负荷发生变化,偏瘫儿童会做出适应性改变,以保持稳定的行走姿势,并降低由于动态平衡丧失而导致跌倒的潜在风险^[24]。

本研究显示,脑瘫组的膝-踝协调变异性在第二双支撑期和摆动期更大。与 Dussault-Picard 等^[24]的研究结果不同。Dussault-Picard 等^[24]的研究中,参与者在平地上以自己选择的速度行走;而本研究采用在跑步机上固定速度行走。对于脑瘫患者而言,履带的转动和速度的适应构成一定挑战^[38],需要不断调整下肢关节间的相对位置以维持身体稳定,防止跌倒^[39]。

矢量编码技术已经被用于研究不同运动任务执行过程中的协调性^[12,15,40],但较少用于中枢神经系统损伤步态协调性检测。本研究将矢量编码技术用于分析痉挛型脑瘫儿童步态的协调性,为步行协调障碍的临床评估和康复效果的精准量化分析提供了可能途径。

本研究仍存在诸多不足与局限。仅分析矢状面,并未分析冠状面和水平面,无法探知不同解剖面间的协调代偿情况;样本量有限,年龄段集中于儿童青少年。未来应进一步扩大样本量,纳入多层次生理特征人群,探究不同年龄、性别、残疾程度患者的行走协调性和变异性特征。

4 结论

痉挛型脑瘫儿童行走时患侧髋-膝、髋-踝和膝-踝关节间在支撑期和摆动期均表现出更差的协调性,在支撑期表现出更大的变异性,提示痉挛型脑瘫儿童下肢运动控制缺陷。

致谢:感谢济南市康复医院和济南市特殊教育学校参与本次研究的康复师、教师及脑瘫儿童。

利益冲突声明:所有作者声明不存在利益冲突。

【参考文献】

- [1] 梁艳华,张琦,胡晓诗,等. 深层肌肉刺激对痉挛型脑瘫儿童肌肉结构和功能的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(12): 1452-1460.
- [2] LIANG Y H, ZHANG Q, HU X S, et al. Effect of deep muscle stimulation on muscle structure and function in children with spastic cerebral palsy [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2024, 30(12): 1452-1460.
- [3] ALBRIGHT A L. Spasticity and movement disorders in cerebral palsy [J]. Childs Nerv Syst, 2023, 39(10): 2877-2886.
- [4] SHEKARI Z, SADEGHIAN AFARANI R, FATOREHCHY S, et al. Relationship between postural asymmetry, balance, and pain in children with spastic cerebral palsy [J]. Pediatr Neurol, 2024, 155: 84-90.
- [5] SURANA B K, FERRE C L, DEW A P, et al. Effectiveness of lower-extremity functional training (LIFT) in young children with unilateral spastic cerebral palsy: a randomized controlled trial [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2019, 33(10): 862-872.
- [6] 祝莉洁,贡国俊,张伟云,等. 超声成像技术在痉挛型脑性瘫痪患儿腓肠肌定量评定中的应用[J]. 中国康复理论与实践, 2022, 28(9): 1079-1083.
- [7] ZHU L J, YUN G J, ZHANG W Y, et al. Application of ultrasonography in quantitative evaluation of gastrocnemius muscles in children with spastic cerebral palsy [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2022, 28(9): 1079-1083.
- [8] SARASWAT P, CARSON L T, SHULL E R, et al. Does use of ankle foot orthoses affect the dynamic motor control index during walking in cerebral palsy and idiopathic toe walking populations? [J]. Gait Posture, 2023, 102: 100-105.
- [9] AHN Y, HONG J, SHIM D, et al. Comparing the lower-limb muscle activation patterns of simulated walking using an end-effector-type robot with real level and stair walking in children with spastic bilateral cerebral palsy [J]. Sensors (Basel), 2023, 23(14): 6579.
- [10] SIDIROPOULOS A, MAGILL R, GORDON A. Coordination of the upper and lower extremities during walking in children with cerebral palsy [J]. Gait Posture, 2021, 86: 251-255.
- [11] 王佳伟,刘晔. 运动协调理论模型与量化方法的演进[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(20): 3256-3264.
- [12] WANG J W, LIU Y. Motor coordination: evolution of theoretical model and quantitative method [J]. Chin J Tissue Eng Res, 2022, 26(20): 3256-3264.
- [13] STEBBINS J, HARRINGTON M, STEWART C. Clinical gait analysis 1973-2023: evaluating progress to guide the future [J]. J Biomech, 2023, 160: 111827.
- [14] IPPERSIEL P, ROBBINS S M, DIXON P C. Lower-limb coordination and variability during gait: the effects of age and walking surface [J]. Gait Posture, 2021, 85: 251-257.
- [15] 马乾峰,丁健,李立,等. 基于矢量编码技术研究功能性踝关节不稳者下肢协调性和变异性[J]. 医用生物力学, 2023, 38(6): 1086-1092.
- [16] MA Q F, DING J, LI L, et al. Lower limb coordination and variability in patients functional ankle instability based on vector coding analysis [J]. J Med Biomech, 2023, 38(6): 1086-1092.
- [17] 王佳伟,刘晔. 不同高度跳深时髋、膝关节协调模式与下肢肌肉活动的关系[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(2): 276-281.
- [18] WANG J W, LIU Y. Hip and knee coordination patterns in relation to lower limb muscle activity during drop jumps at different heights [J]. Chin J Tissue Eng Res, 2023, 27(2): 276-281.
- [19] SAKUMA K, TATEUCHI H, NISHISHITA S, et al. Gait kinematics and physical function that most affect intralimb coordination in patients with stroke [J]. NeuroRehabilitation, 2019, 45(4): 493-499.
- [20] CELESTINO M L, VAN EMMERIK R, BARELA J A, et al. Intralimb gait coordination of individuals with stroke using vector coding [J]. Hum Mov Sci, 2019, 68: 102522.
- [21] 胡晓诗,张琦,岳青,等. 矫形弹力绷带对痉挛性偏瘫脑性瘫痪患儿步态对称性和步行能力的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2023, 29(9): 1083-1089.
- [22] HU X S, ZHANG Q, YUE Q, et al. Effect of orthopedic elastic bandages on gait symmetry and walking ability in children with spastic hemiplegic cerebral palsy [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2023, 29(9): 1083-1089.

- [17] CARCREFF L, GERBER C N, PARASCHIV-IONESCU A, et al. Comparison of gait characteristics between clinical and daily life settings in children with cerebral palsy [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 2091.
- [18] 中国康复医学会儿童康复专业委员会, 中国残疾人康复协会小儿脑性瘫痪康复专业委员会, 中国医师协会康复医师分会儿童康复专业委员会, 等. 中国脑性瘫痪康复指南(2022)第一章: 概论[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2022, 37(12): 887-892.
- Chinese Association of Rehabilitation Medicine Pediatric Rehabilitation Committee, Chinese Association of Rehabilitation of Disabled Persons Rehabilitation Committee for Cerebral Palsy, Chinese Medical Doctor Association Pediatric Rehabilitation Committee, et al. Chapter I: Introduction of Chinese Cerebral Palsy Rehabilitation Guide (2022) [J]. *Chin J Prac Pediatr Clin Prac*, 2022, 37(12): 887-892.
- [19] 王立端, 曲峰. 运动水平对不同跑速条件下的下肢关节协调性特征的影响[J]. *天津体育学院学报*, 2023, 38(6): 740-744.
- WANG L D, QU F. Effect of skill level on the coordination of lower limb joints in running at different speeds [J]. *J Tianjin Univ Sport*, 2023, 38(6): 740-744.
- [20] ROGERS-BRADLEY E, YEON S H, LANDIS C, et al. Variable-stiffness prosthesis improves biomechanics of walking across speeds compared to a passive device [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 16521.
- [21] LABONTE D, BISHOP P J, DICK T J M, et al. Dynamic similarity and the peculiar allometry of maximum running speed [J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2181.
- [22] CHEN Y, WAN A, MAO M, et al. Tai Chi practice enables prefrontal cortex bilateral activation and gait performance prioritization during dual-task negotiating obstacle in older adults [J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14: 1000427.
- [23] VITRIKAS K, DALTON H, BREISH D. Cerebral palsy: an overview [J]. *Am Fam Physician*, 2020, 101(4): 213-220.
- [24] DUSSAULT-PICARD C, IPPERSIEL P, BÖHM H, et al. Lower-limb joint-coordination and coordination variability during gait in children with cerebral palsy [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2022, 98: 105740.
- [25] CEN X, YU P, SONG Y, et al. Influence of medial longitudinal arch flexibility on lower limb joint coupling coordination and gait impulse [J]. *Gait Posture*, 2024, 114: 208-214.
- [26] DESAI G A, GRUBER A H. Bilateral differences in coordination variability among injured and uninjured runners: a prospective study [J]. *J Biomech*, 2022, 132: 110938.
- [27] BEITTER J, KWON Y H, TULCHIN-FRANCIS K. A combined method for binning coupling angles to define coordination patterns [J]. *J Biomech*, 2020, 103: 109598.
- [28] 何艳, 张琦, 胡晓诗, 等. 功能性电刺激康复踏车训练对痉挛型脑性瘫痪儿童下肢运动功能的效果[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(12): 1464-1469.
- HE Y, ZHANG Q, HU X S, et al. Effect of functional electrical stimulation rehabilitation cycling on lower limb motor function in children with spastic cerebral palsy [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2021, 27(12): 1464-1469.
- [29] JIANG W, ZHANG L, WEI M, et al. A preliminary study on the spasticity reduction of quadriceps after selective dorsal rhizotomy in pediatric cases of spastic cerebral palsy [J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2024, 166(1): 108.
- [30] LI H, CHEN Y, DU Q, et al. Abnormal gait partitioning and real-time recognition of gait phases in children with cerebral palsy [J]. *Biomed Sig Proc Control*, 2023, 86: 105085.
- [31] GONÇALVES R V, MENDES M B, FIGUEIREDO P R P, et al. Gait profiles of children and adolescents with cerebral palsy according to their gross motor levels [J]. *J Bodyw Mov Ther*, 2025, 42: 313-318.
- [32] SANGEUX M, VIEHWEGER E, ROMKES J, et al. On the clinical interpretation of overground gait stability indices in children with cerebral palsy [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 26363.
- [33] LI L, ZHANG L, CUI H, et al. Gait and sEMG characteristics of lower limbs in children with unilateral spastic cerebral palsy during walking [J]. *Gait Posture*, 2024, 108: 177-182.
- [34] ZHAO J, HAN W, TANG H. Lower limbs inter-joint coordination and variability during typical Tai Chi movement in older female adults [J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1164923.
- [35] IPPERSIEL P, DUSSAULT-PICARD C, MOHAMMADYARI S G, et al. Muscle coactivation during gait in children with and without cerebral palsy [J]. *Gait Posture*, 2024, 108: 110-116.
- [36] SUKAL-MOULTON T, DE CAMPOS A C, ALTER K E, et al. Relationship between sensorimotor cortical activation as assessed by functional near infrared spectroscopy and lower extremity motor coordination in bilateral cerebral palsy [J]. *Neuroimage Clin*, 2018, 20: 275-285.
- [37] LARSON S C, SMITH A E, ARAVAMUTHAN B R, et al. Pediatric constraint-induced movement therapy: current practices and implementation barriers [J]. [ahead of print]. *OTJR (Thorofare N J)*, 2024. doi: 10.1177/15394492241300607.
- [38] CORTÉS-PÉREZ I, GONZÁLEZ-GONZÁLEZ N, PEINADO-RUBIA A B, et al. Efficacy of robot-assisted gait therapy compared to conventional therapy or treadmill training in children with cerebral palsy: a systematic review with meta-analysis [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(24): 9910.
- [39] GARCIA-DEL PINO-RAMOS S, ROMERO-GALISTEO R P, PINERO-PINTO E, et al. Effectiveness of treadmill training on the motor development of children with cerebral palsy and Down syndrome [J]. *Medicina (B Aires)*, 2021, 81(3): 367-374.
- [40] TORO I S, WEIR G, AMADO A, et al. Is coordination variability using vector coding different in overground and treadmill walking and running? [J]. *Gait Posture*, 2022, 92: 413-420.

(收稿日期: 2024-10-22 修回日期: 2025-03-10)