



单侧下肢缩短患儿失衡的特殊问题研究

CHARACTERISTICS OF BODY BALANCE DISORDER IN CHILDREN WITH UNILATERAL LOWER LIMB SHORTENING

© I.E. Nikityuk¹, E.L. Kononova¹, Yu.E. Garkavenko^{1, 2}

¹ The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia

² North-Western State Medical University n.a. I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

Received: 25.02.2019

Revised: 17.07.2019

Accepted: 09.09.2019

引言: 儿童单侧下肢缩短问题在现代骨科极为重要。在儿童的生长发育过程中, 发生单侧下肢缩短, 可导致双下肢解剖学不对称和下肢负重失衡加重。骨盆和脊柱的继发性畸形会加重患儿的残疾程度。躯体姿势失衡的特征取决于病因(比如是先天性还是后天性)和单侧下肢缩短患儿保留的运动模式, 而相关研究依旧不足。

目的: 本研究的目的是考察单侧下肢缩短患儿姿势的稳定性, 根据病因评估躯体平衡疾病。

材料和方法: 确定11例健康儿童(平均年龄 11.9 ± 0.73 岁)的标准稳定性测定值(第一组), 测定22例单侧下肢缩短患儿的稳定运动图参数。第二组包括11例先天性单侧下肢缩短(平均缩短 4.8 ± 0.8 cm)患儿(平均年龄 11.9 ± 1.05 岁)。第三组也包括11例(平均年龄 12.2 ± 0.78 岁)患儿, 但患获得性单侧下肢缩短(平均缩短 4.5 ± 0.38 cm)。统计研究包括相关分析。

结果: 两组患者的纵向平衡稳定性明显下降, 表现为与正常稳定性测定值有明显偏差; 与健康儿童相比, 其压力中心偏移增加, 稳定运动图数值偏大, 压力偏移长度不同。根据病因, 通过稳定性测定法可以确定单侧下肢缩短患者的适应性姿势机制, 评估其运动策略的充分程度。

结论: 获得性单侧下肢缩短患者已经形成了一种合适的适应性运动模式; 遇到新情况时, 该姿势稳定系统的表现也较为稳定。先天性单侧下肢缩短患者维持姿势稳定性的策略不同, 采取的运动模式欠佳。对单侧下肢负重不对称患儿进行稳定性测定评估, 是一种具有潜力的运动系统控制代偿机制形成研究方法, 对制定康复方案至关重要。

关键词: 单侧下肢缩短; 姿势控制; 稳定性测定; 肢体负重不对称。

Background. In modern orthopedics, the problem of unilateral shortening of the lower limbs in children is extremely important. In the process of child growth, there occurs progression of the shortened segment, which leads to anatomical asymmetry of the lower limbs and an increase in the imbalance of the limb load. Secondary deformities of the pelvis and spine aggravate the patient's disability. The features of abnormal postural balance of the body depending on the etiology of the disease, such as congenital or acquired, as well as the degree of preservation of motor stereotypes in children with unilateral shortening of the lower limbs, are still understudied.

Aim. The aims of this work are to study postural stability in children with unilateral shortening of the lower limbs and to assess the disorders of body balance depending on the etiology of the lesion.

Materials and methods. The standard stabilometric values of 11 healthy children (average age, 11.9 ± 0.73 years) were determined (group 1), as well as the statokinesiogram parameters in 22 patients with unilateral shortening of the lower limb. The second group included 11 children (average age, 11.9 ± 1.05 years) with congenital shortening of the lower limb (average shortening, 4.8 ± 0.8 cm). The third group also consisted of 11 children (average age, 12.2 ± 0.78 years), but with acquired shortening of the lower limb (average shortening, 4.5 ± 0.38 cm). Statistical research included correlation analysis.

Results. A significant decrease in the stability of the vertical balance was observed in both groups of patients, which was demonstrated by pronounced deviations from the nominal values of stabilometric parameters, compared with healthy children: an increased center of pressure displacement, large values of the statokinesiogram area, and the length of the pressure displacement path. It was possible to determine the state of adaptive postural mechanisms for assessing

the formation of the degree of adequacy of the motor strategy in patients with unilateral shortening of the lower limb, depending on the etiology of the lesion, owing to the method of stabilometry.

Conclusion. An appropriate adaptive motor stereotype has been formed in patients with acquired shortening of the lower limb; in the new conditions, the system for ensuring postural balance is stabilized. There is a different strategy for maintaining posture stability characterized by a nonoptimal motor stereotype in patients with congenital shortening of the lower limb. The stabilometric assessment of the asymmetry of the lower limb load is a promising method for studying the formation of compensatory mechanisms for controlling the locomotion system, which is important when planning rehabilitation measures.

Keywords: shortening of the lower limb; postural control; stabilometry; limb load asymmetry.

引言

处理儿童单侧下肢缩短问题对当代骨科尤为迫切。在儿童的生长发育过程中,管状骨的干骺端及骨骺区遭受先天或后天损伤,造成受累肢缩短,从而引发继发性盆骨畸形、脊柱畸形和残疾。这一病变通常由双下肢长管状骨干骺端及骨骺生长区先天或获得性功能障碍所致,合并营养障碍[1]。但干骺端及骨骺软骨活动发生了改变,甚至完全阻止了细胞和体液发挥作用[2]。再者,双下肢解剖学不对称随着儿童年龄的增长呈进行性发展,导致站立和行走时负重失衡加重[3];这种现象反过来造成骺板机械负重分布不均和骺板功能的进一步损伤[4]。

虽然多种心理[5, 6]和病理[7, 8]状态下双下肢负重失衡的研究备受关注,但单侧下肢缩短患者肌肉骨骼系统的适应能力,依然缺乏充足的研究[9]。不同单侧下肢缩短病因导致的不同姿势功能受损特征,以及运动模式保留程度,依然基本无人探讨;在制定骨科康复方案时,对后者的评估至关重要[10]。对下肢不对称躯体如何保持纵向平衡问题进行研究后,能够分析姿势控制损伤机制,评估双下肢长度手术对齐后的恢复几率[11]。用于上述研究的稳定性测定方法,对于探讨躯体对控制肌肉活动的适应性反应形成过程不可或缺,同时对新型运动控制技术系统的建立至关重要[12]。

本研究的目的是确定单侧下肢缩短患儿的姿势稳定性,根据病因评估躯体失衡问题。

材料和方法

研究设计: 开展单一阶段回顾性研究。

研究条件: 测定11例8至16岁健康儿童(平均年龄 11.9 ± 0.73 岁)的稳定性测定指标标准值。

分析了主要患儿组的病例和影像学检查结果。第一组为对照组;第二组包含11例8至16岁患儿(平均年龄 11.9 ± 1.05 岁),其患有先天性单侧下肢缩短,股骨和胫骨的干骺端及骨骺软骨功能低下。未评估受累肢骨骺区病变过程中各因素所起作用。双下肢长度平均差值为 $\Delta l = 4.8 \pm 0.80$ cm(图1-a)。第3组包括11例9至16岁(平均年龄 12.2 ± 0.78 岁)患儿,其患有后天性单侧下肢缩短,伴血源性骨髓炎发作后股骨近端干骺端及骨骺生长期破坏性改变。因股骨长度缩短,双下肢长度平均差值为 $\Delta l = 4.5 \pm 0.38$ cm(图1-b)。两组患者都患有受累肢大腿及小腿软组织肥大,严重程度不一。

研究组在年龄分布和受累肢缩短程度上相一致。此外,每组的关键入选标准是无膝关节成角畸形。

排除标准: 排除发生膝关节生长软骨病变的患者,因为膝关节多方向成角畸形见于大部分患者。

方法: 运用MBN Biomechanika(MBN科技医药公司)软件和硬件套组,儿童双足

采取“欧洲”体位，即将双足放在平台上，双侧足跟与足前部内缘形成 30° 夹角。让患者采取一种舒服的直立位，双侧上肢低垂，放于身侧，贴在双下肢上。对于严重单侧下肢缩短的患儿，支持功能仅由足前负重进行代偿。根据标准功能性测试展开研究，患者在测试过程中睁眼闭眼，记录下躯体压力中心（PC）偏移指标。稳定图是一幅椭圆图，方向不同，记录了离心率（椭圆伸长程度）的不同公式，通过图形表达PC摆动特点（图2）。计算额状面 x （mm）和矢状面 y （mm）的PC偏移值，并计算 y 与 x 的比值，即稳定运动图椭圆长度与宽度的比值（ y/x ），旨在确定患者的轴向平衡策略（额状面或矢状面）[13]。

测定参数，即PC坐标轴 X （mm）和 Y （mm）、PC轨迹平均长度（ L ，mm）、面积 S （ mm^2 ）。计算相对于矢状面 AI （ $^\circ$ ）的最佳平均摆动方向角，评估其体征，并计算 AI 在睁闭眼测试中的变化 ΔAI （ $^\circ$ ）。

数据处理方法：根据夏皮罗-威尔克检验（Shapiro-Wilk test），稳定性测定指标分布的特征为非参数统计，因此运用夏皮罗-威尔克检验比较无关样本数据。数据用中位数和四分位距（25%-75%）表示。统计显著性阈值取 $p < 0.05$ 。运用威尔科克森检验（Wilcoxon test）分析相关样本。采用非参数斯皮尔曼（Spearman）系数 r_s 研究两个指标的线性关系，进行相关分析。

结果

如定量指标数据所示（表1），所有单侧下肢缩短患儿均有明显姿势平衡障碍。这一现象表现为两组患者的PC摆动平均值 L 和 S 明显高于正常水平，第二组和第三组的上述指标无显著差异。



图1. 双下肢全景放射片：a：患者K.，10岁，先天性右下肢缩短4.5cm；b：患者A.，16岁，获得性右下肢缩短4.0cm

通过额状面（ X 轴，mm）PC移位分析，确定两组患者双下肢负重分布不对称。在这种情况下，受累肢代偿性失负，体重被重新分配到另一侧完好下肢上。先天性和获得性缩短患者的平均PC侧向位移值较高，但两组无差异。此外，在睁闭眼测试中，两组下肢缩短程度与 ΔI 及 X 坐标的相关性为中等（表2）。双下肢负重分配不对称的这种特性，表明站立时由于受累下肢支持功能减弱，健康下肢静负载发生代偿性重新分配。

矢状面（ Y 轴，mm）PC移位分析表明，仅获得性单侧下肢缩短患儿出现明显前侧偏移。此外，该组的 Y 坐标平均值与健康儿童及先天性单侧下肢缩短患儿相比存在显著差异。在同组患儿中，单侧下肢缩短程度 ΔI 及视觉控制下 Y 坐标的相关性不强，闭眼测验时，这一相关性变为中等程度。然而，对于先天性单侧下肢缩短患儿，虽然有视觉传入姿势控制，但相关分析提示 Y 坐标与单侧下肢缩短程度 ΔI 呈中等相关，这种相关性较为稳定。

健康儿童和单侧LE缩短患儿的稳定运动图指标

参数		研究组			夏皮罗-威尔克检验 p 值
		健康儿童 (1) Me (Q_1-Q_2) $n = 11$	先天性单侧LE缩短患儿 (2) Me (Q_1-Q_2) $n = 11$	获得性单侧LE缩短患儿 (3) Me (Q_1-Q_2) $n = 11$	
X (mm)	OE	0.3 (0.1-0.4)	21.9 (2.2-26.0)	11.8 (7.6-27.7)	$p_{1-2} < 0.0001$ $p_{1-3} = 0.0001$ $p_{2-3} = 1.0$
	CE	0.3 (0.1-0.4)	21.6 (3.3-25.2)	11.4 (4.8-19.1)	$p_{1-2} = 0.0007$ $p_{1-3} < 0.0001$ $p_{2-3} = 0.646$
Y (mm)	OE	3.7 (2.4-5.2)	24.2 (3.9-37.8)	32.8 (28.4-49.4)	$p_{1-2} = 0.293$ $p_{1-3} < 0.0001$ $p_{2-3} = 0.057$
	CE	7.7 (4.4-9.5)	25.6 (3.3-38.2)	37.5 (30.7-51.8)	$p_{1-2} = 0.088$ $p_{1-3} < 0.0001$ $p_{2-3} = 0.03$
L (mm)	OE	637 (532-705)	835 (723-1152)	986 (811-1035)	$p_{1-2} = 0.004$ $p_{1-3} = 0.0005$ $p_{2-3} = 0.646$
	CE	766 (650-911)	1206 (902-1430)	1041 (848-1296)	$p_{1-2} = 0.003$ $p_{1-3} = 0.007$ $p_{2-3} = 0.694$
S (mm ²)	OE	366 (344-621)	529 (365-1109)	880 (570-1343)	$p_{1-2} = 0.066$ $p_{1-3} = 0.007$ $p_{2-3} = 0.115$
	CE	698 (386-806)	861 (598-1035)	1184 (419-1571)	$p_{1-2} = 0.056$ $p_{1-3} = 0.087$ $p_{2-3} = 0.599$
y/x		1.39 (1.23-1.67)	1.18 (0.95-1.40)	1.13 (0.86-1.51)	$p_{1-2} = 0.015$ $p_{1-3} = 0.010$ $p_{2-3} = 0.664$

注: $p_{1-2}; p_{1-3}; p_{2-3}$: 组间差异显著性水平 Me: 中位数 LE: 双下肢 OE: 睁眼 CE: 闭眼。

分析稳定图形状时发现, 与两组正常平均 y/x 率相比, 形状明显缩小, 表现为矢状面椭圆形伸长率降低。这表明两组患者矢状面和额状面PC摆动策略可能相同, 趋势明显一致。这种平衡保持策略接近病理性改变, 可能表明双下肢长度不对称患者肌肉骨骼系统的适应力明显降低。

获得性单侧下肢缩短患儿的PC平均摆动方向角 AI 在保留视觉传入功能时一直保持正常水平, 只有在接受闭眼测试时才会明显增加(表3)。考察参数水平后发现, 不论有

无视觉控制, 先天性单侧下肢缩短患儿的平均摆动方向角 AI 都明显超过健康儿童。

睁闭眼测试之间的摆动方向角变化幅度 ΔAI 明显超过先天性单侧下肢缩短组的正常水平。与仅仅闭眼的健康儿童相比, 获得性单侧下肢缩短组 ΔAI 指标有显著差异。定性分析使描述摆动方向角 AI 水平的定量图更加完善。

在健康儿童的稳定运动图上, 摆动方向角虽然受视觉控制影响, 但与矢状面有轻微

表2

LE缩短患者X轴及Y轴PC移位与 ΔI 值的线性相关分析

研究组		斯皮尔曼相关系数 r_s	
		相关 $X \sim \Delta I$	相关 $Y \sim \Delta I$
先天性LE缩短 ($n = 11$)	OE	0.51	0.43
	CE	0.61	0.49
获得性LE缩短 ($n = 11$)	OE	0.58	0.22
	CE	0.51	0.45

注：PC：压力中心，LE：双下肢，OE：睁眼，CE：闭眼。

表3

健康儿童和LE单侧缩短患儿稳定运动图的PC最佳摆动方向角

参数		研究组			夏皮罗-威尔克检验 p 值
		健康儿童 (1) Me (Q_1-Q_2) $n = 11$	先天性单侧LE缩短 患儿 (2) Me (Q_1-Q_2) $n = 11$	获得性单侧LE缩短 患儿 (3) Me (Q_1-Q_2) $n = 11$	
$ AI , ^\circ$	OE	2.6 (1.1-2.8)	5.3 (2.4-7.7)	2.7 (1.4-5.3)	$p_{1-2} = 0.013$ $p_{1-3} = 0.1$ $p_{2-3} = 0.149$
		$p = 0.859$	$p = 0.026$	$p = 0.006$	
	CE	1.4 (0.1-2.9)	14.4 (11.5-20.9)	9.1 (5.3-20.4)	$p_{1-2} < 0.0001$ $p_{1-3} < 0.0001$ $p_{2-3} = 0.149$
$\Delta AI, ^\circ$		2.5 (0.4-3.0)	9.8 (7.2-16.2)	7.9 (5.4-19.7)	

注： $p_{1-2}; p_{1-3}; p_{2-3}$ ：组间差异显著性水平； p ：睁闭眼测试（威尔科克森检验）中的组间差异显著性水平；||：指标模块。PC：压力中心，LE：双下肢，OE：睁眼，CE：闭眼。

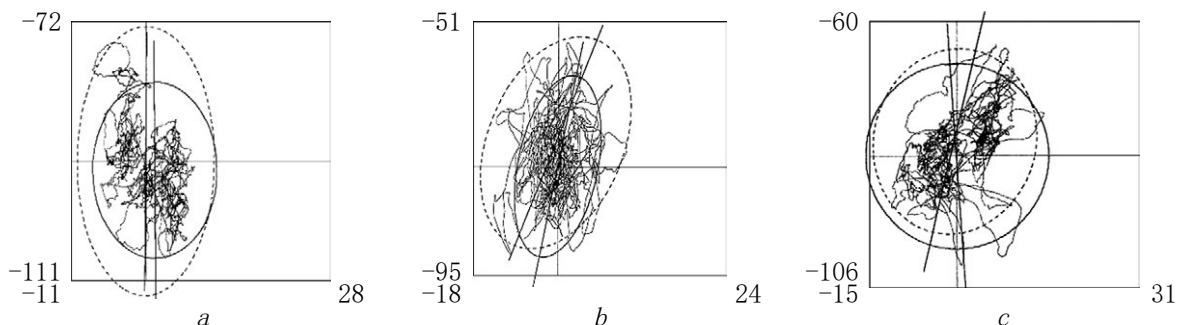


图2. 稳定运动图压力中心最佳摆动方向角体征：a：健康儿童B.，10岁，双下肢负重对称；b：患者N.，12岁，先天性左下肢缩短；c：患者T.，13岁，获得性左下肢缩短。椭圆的长轴为摆动方向，相对于矢状面而言，顺时针是正角，逆时针为负角。实线是睁眼，虚线是闭眼

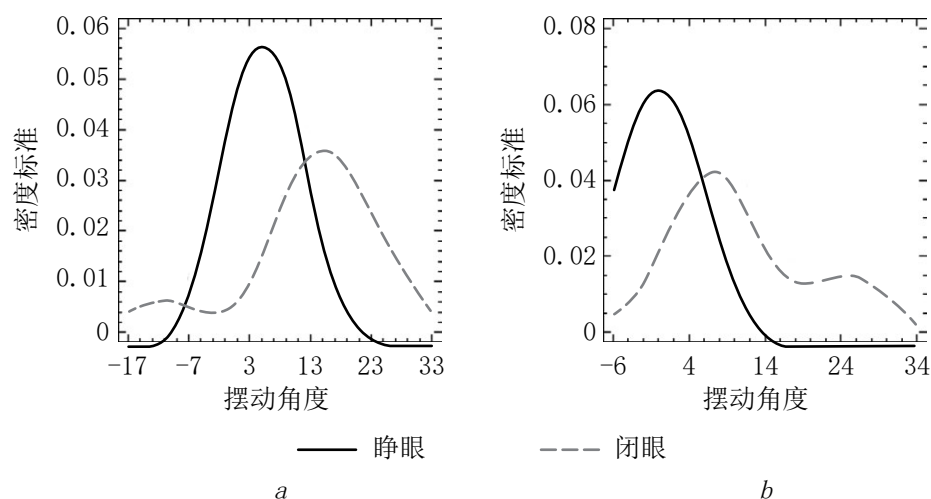


图3. 单侧下肢缩短患儿稳定运动图的压力中心最佳摆动方向角密度曲线：
a: 先天性单侧下肢缩短；b: 获得性单侧下肢缩短

偏移（图2-a）。先天性单侧下肢缩短患儿虽然受视觉控制，但摆动方向角持续不变。再者，摆动方向角与病灶所在侧有关，左侧为正角，右侧为负角（图2-b）。根据视觉传入状态，获得性单侧下肢缩短患儿的PC摆动方向角体征出现完全相反的变化（图2, c）。

不论两组摆动方向体征是什么，闭眼测试时 $A1$ 角度始终大于睁眼测试（图3, a和b），可能表明在没有视觉传入的情况下姿势稳定性有所下降。

结果讨论

众所周知，正常情况下，健康人群的体重均衡地分配在双下肢，呈对称性，躯体与平衡体位有所倾斜时能够以等分力矩进行代偿。负重分配不对称，表示负重更多的单侧下肢在维持直立行走姿势时发挥的作用比未负重侧更大[14]。失衡本身可以引发适应性姿势运动反应[15]，随着双下肢不对称持续时间的推移，患者形成了一种病理性运动模式[16]。在本研究中，先天性和后天性单侧下肢缩短患儿的姿势稳定性均严重受损。对于两组双下肢长度不对称的患者，稳定运动图S和L等稳定测定参数

较健康儿童有所上升。由单侧下肢缩短产生的明显适应性反应是完整肢负重增加，因为受累肢支持功能降低。矢状面可见直立位稳定性丧失，另外，患者根据肢体缩短的病因实施了不同的姿势稳定性维持策略。尽管所有患者受累侧足部的支撑点移至前侧，但先天性单侧下肢缩短患儿的PC不仅在前侧发生明显移位，也有向后移位的趋势。但后天性单侧下肢缩短患者的PC明显移至前侧，与正常儿童在人为创造的直立姿势略不稳定环境相似，在该环境下，将正常儿童的部分躯体负重任意分配至单侧下肢，对侧不负重[17]。因此，获得性单侧下肢缩短患儿为维持矢状面直立姿势，形成了额外静矩，有助于增强躯体平衡的稳定性。此外，该组患者接受睁眼测试时，PC在Y轴上的位移 Δl 并非取决于肢体的缩短程度，从而证实了患者保有维持直立稳定性的生理机制。先天性单侧下肢缩短患儿PC在矢状面的移位与肢体缩短程度密切相关，但不取决于视觉信息输入量，这表明患者建立了明显的躯体平衡系统病理反应，且姿势控制模式出现损伤。

应当注意的是，研究组患者虽然在年龄和下肢缩短程度上一致，但骨生长区损伤程度各不相同。双下肢肌肉肥大的严重程度也有所差异。解释患者平衡能力时必须

考虑这样的解剖学特点。对于先天性单侧下肢缩短患儿，形成膝关节的骨生长区参与病理过程的频率更高，而膝关节能够保持矢状面平衡。发生股骨生长区近端干骺端及骨骺病变的患者，可能会出现直立平衡受损，伴随额状面PC摆动角度病理性改变。但对于慢性双下肢不等长患儿，不论病因是什么，都必须考虑肌肉骨骼系统运动链形成的代偿性改变。一方面，这一改变表现为骨盆侧向变形和脊柱弯曲[18]。另一方面，肌肉骨骼系统所有连结处的连接方式多种多样，在儿童发育的过程中可引起积极稳定的运动生物力学改变[19]。与下肢肌肉一样，骨盆及脊柱肌肉对人类直立平衡调节产生的作用最大[20]，因此其复杂的相互作用过程让病因不同且双下肢长度不一的患者可能产生统一的姿势控制系统适应性平衡反应，以应对异常的生物力学改变。本研究评估了患儿在额状面或矢状面的平衡策略，结果证实了上述设想，即平均 y/x 比率反映了两组患者的矢状面平衡策略，两组患者的 y/x 比率水平并无差异，但与正常水平相比有所下降。

获得性单侧下肢缩短患者的PC摆动方向角AI任意值，与健康儿童的一般稳定运动图轴向分配原则一致。因此，根据本研究结果，对于获得性单侧下肢缩短患者，承受部分负重的单侧下肢在姿势控制中起到了积极作用，表明已形成接近于病理性改变的适应性运动模式。这意味着在该类患者中，这种确保躯体姿势平衡的系统遇到新情况时具有充足的稳定性。

未受视觉控制的先天性单侧下肢缩短患儿，PC摆动方向角AI的体征保持不变。因此，与视觉剥夺有关的视觉传入信息量有所减少时，本体感受器未对PC运动感觉予以纠正。这一运动策略缺乏视觉调节系统优势，具体表现为姿势平衡系统稳定性丧失，因为在没有视觉控制的情况下，

直立稳定性保持机制无法充分纠正患儿在空间平面上的体位。这一负责有效控制姿势的特异性运动程序，实则欠佳或具有病理学特征[21]。这表明先天性单侧下肢缩短患者形成了欠佳的运动模式。

应该强调的是，本研究仅包括单纯性双下肢不对称患儿，因为其缩短一侧依然保有运动轴。因此，本研​​究所述数据无法反映所有问题，需谨慎阐述，不适用于双下肢不对称合并畸形的患者。

结论

运动测定法能够确定适应性姿势机制的状态，旨在根据病因评估单侧下肢缩短运动模式的充分程度。现已证明，获得性单侧下肢缩短患者已经形成了充分的适应性运动模式，接近于生理学模式。而先天性单侧下肢缩短患者则采取了不同的姿势稳定性保持策略，其特征是在不受视觉传入控制的影响下形成了一种欠佳的运动模式，表现为缺乏代偿性PC移位、矢状面前移、最佳摆动方向角不变等。该类患者的病理性姿势反应，可视为姿势稳定性适应能力降低的依据。本研究提出的运动障碍诊断方法具有良好的前景，可用于评估经骨牵引骨接合术延长下肢后新运动程序形成的有效性。

其他信息

经费来源。 本研究属于国家课题研究。

利益冲突。 作者声明，不存在与本文发表有关的明显及潜在利益冲突。

伦理审查。 本研究依据俄罗斯卫生部修订的世界医学协会（World Medical Association）《赫尔辛基宣言》（Helsinki Declaration）开展，由特纳儿童

矫形科学研究所 (Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics) 伦理委员会审批通过 (试验方案5号, 2018年11月27日)。患者 (及其代理人) 签署了自愿知情同意书, 同意处理和发表个人资料。

致谢。 笔者向特纳儿童矫形科学研究所 (Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics) 国际项目和对外关系执行部负责人Alena Nikolaevna Melchenko表示感谢, 感谢她将本文摘要翻译成英文。

作者贡献

*I. E. Nikityuk*负责确立研究方法、处理数据、撰写全文、收集处理后的文献资料。

*E. L. Kononova*负责开展本研究工作和处理数据。

*Yu. E. Garkavenko*负责编辑文本。

References

1. Nguyen JC, Markhardt BK, Merrow AC, Dwek JR. Imaging of pediatric growth plate disturbances. *Radiographics*. 2017;37(6):1791-1812. <https://doi.org/10.1148/rg.2017170029>.
2. Никитюк И.Е., Попов И.В., Полянский В.А., Дудкин В.И. Структура хряща метаэпифизарных пластинок роста в условиях полной изоляции от клеточно-гуморальных воздействий при пересадке в мягкие ткани (экспериментальное исследование) // Морфология. – 2007. – Т. 131. – № 3. – С. 45–49. [Nikityuk IE, Popov IV, Polyanskiy VA, Dudkin VI. Structure of metaepiphyseal growth plate cartilage as influenced by total isolation from cellular and humoral influences after its transplantation into soft tissues (an experimental study). *Morfologiya*. 2007;131(3):45-49. (In Russ.)]
3. Щуров В.А., Новиков К.И., Мурадисинов С.О. Влияние разновысокости нижних конечностей на биомеханические параметры ходьбы // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15. – № 4. – С. 102–107. [Shchurov VA, Novikov KI, Muradisinov SO. Vliyaniye raznovysokosti nizhnikh konechnostey na biomekhanicheskie parametry khod'by // *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2011;15(4):102-107. (In Russ.)]
4. Guevara JM, Moncayo MA, Vaca-Gonzalez JJ, et al. Growth plate stress distribution implications during bone development: a simple framework computational approach. *Comput Methods Programs Biomed*. 2015;118(1):59-68. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.10.007>.
5. Kilby MC, Newell KM. Intra- and inter-foot coordination in quiet standing: footwear and posture effects. *Gait Posture*. 2012;35(3):511-516. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.11.018>.
6. Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Поддержание вертикальной позы человека при асимметричной нагрузке на ноги и односторонней фиксации коленного сустава // Физиология человека. – 2018. – Т. 44. – № 1. – С. 49–55. [Kazennikov OV, Kireeva TB, Shlykov VY. Maintenance of human vertical posture upon asymmetric leg loading and fixation of the knee joint of one leg. *Fiziol Cheloveka*. 2018;44(1):49-55. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S013116461801-0014>.
7. Aruin AS, Kanekar N. Effect of a textured insole on balance and gait symmetry. *Exp Brain Res*. 2013;231(2):201-208. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3685-z>.
8. Boonstra TA, Schouten AC, van Vugt JP, et al. Parkinson's disease patients compensate for balance control asymmetry. *J Neurophysiol*. 2014;112(12):3227-3239. <https://doi.org/10.1152/jn.00813.2013>.
9. Никитюк И.Е., Гаркавенко Ю.Е., Кононова Е.Л. Особенности опорной функции нижних конечностей у детей с последствиями поражения проксимального отдела бедра острым гематогенным остеомиелитом // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 14–22. [Nikityuk IE, Garkavenko YE, Kononova EL. Special aspects of the support function of lower limbs in children with the consequences of unilateral lesion of the proximal femur with acute hematogenous osteomyelitis. *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2018;6(1):14-22. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/PTORS6114-22>.
10. Kumar SN, Omar B, Joseph LH, et al. Evaluation of limb load asymmetry using two new mathematical models. *Glob J Health Sci*. 2014;7(2):1-7. <https://doi.org/10.5539/gjhs.v7n2p1>.
11. Шейн А.П., Сайфутдинов М.С., Криворучко Г.А. Локальные и системные реакции сенсомоторных структур на удлинение и ишемию конечностей. – Курган: ДАММИ, 2006. – 284 с. [Shein AP, Sayfutdinov MS, Krivoruchko GA. Lokal'nye i sistemnye reaktsii sensomotornykh struktur na udlinienie i ishemiyu konechnostey. Kurgan: DAMMI; 2006. 284 p. (In Russ.)]

12. Грибанов А.В., Шерстенникова А.К. Физиологические механизмы регуляции постурального баланса человека (обзор) // Журнал медико-биологических исследований. – 2013. – № 4. – С. 20–29. [Gribanov AV, Sherstennikova AK. Physiological mechanisms of human postural balance regulation (review). *Medical and biological sciences*. 2013;(4):20-29. (In Russ.)]
13. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. – М.: Т.М. Андреева, 2007. – 640 с. (Skvortsov DV. Diagnostika dvigatel'noy patologii instrumental'nymi metodami: analiz po-khodki, stabilometriya. Moscow: T.M. Andreeva; 2007. 640 p. (In Russ.))
14. Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Влияние структуры опорной поверхности под стопой на поддержание вертикальной позы при разном распределении нагрузки между ногами // Физиология человека. – 2016. – Т. 42. – № 4. – С. 61–68. [Kazennikov OV, Kireeva TB, Shlykov VY. Influence of the structure of the support surface under the sole on vertical posture during standing with different body weight distributions between legs. *Fiziol Cheloveka*. 2016;42(4):61-68. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164616040044>.
15. Wilson EL, Madigan ML, Davidson BS, Nussbaum MA. Postural strategy changes with fatigue of the lumbar extensor muscles. *Gait Posture*. 2006;23(3):348-354. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.04.005>.
16. Айдаров В.И., Скворцов А.П. Формирование правильного двигательного стереотипа ходьбы у пациентов с дефицитом локомоторных функций нижних конечностей // Практическая медицина. – 2013. – Т. 2. – № 1–2. – С. 12–13. [Aydarov VI, Skvortsov AP. Formation of correct movement pattern of walking in patients with a deficiency of locomotor functions of the lower limbs. *Prakticheskaya meditsina*. 2013;2(1-2):12-13. (In Russ.)]
17. Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Особенности поддержания вертикальной позы при неравномерной нагрузке на ноги // Физиология человека. – 2013. – Т. 39. – № 4. – С. 65–73. [Kazennikov OV, Kireeva TB, Shlykov VY. Characteristics of the maintenance of the vertical posture during standing with an asymmetrical load on the legs. *Fiziol Cheloveka*. 2013;39(4):65-73. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164613030119>.
18. Щеколова Н.Б., Лихачева Л.В. Динамика биомеханических и электромиографических изменений при консервативном лечении детей с идиопатическим укорочением нижних конечностей // Пермский медицинский журнал. – 2013. – Т. 30. – № 1. – С. 73–78. [Schekolova NB, Likhacheva LV. Dynamics of biomechanical and electromyographic changes in conservative treatment of children with idiopathic low limb shortening. *Permskii meditsinskii zhurnal*. 2013;30(1):73-78. (In Russ.)]
19. Бальсевич В.К. Очерки по возрастной кинезиологии человека. – М.: Советский спорт, 2009. – 220 с. [Bal'sevich VK. Ocherki po vozrastnoy kineziologii cheloveka. Moscow: Sovetskiy sport; 2009. 220 p. (In Russ.)]
20. Абдуразаков У.А., Абдуразаков А.У., Юлдашев А.Ж. Асимметрия тела человека: внешние проявления и взаимосвязь с заболеваниями опорно-двигательной системы // Вестник Алматинского государственного института усовершенствования врачей. – 2016. – № 4. – С. 28–31. [Abdurazakov UA, Abdurazakov AU, Yuldashev AZh. Asymmetry of a body of the person, external manifestations and interrelation with diseases of musculoskeletal system. *Vestnik Almatinskogo gosudarstvennogo instituta usovershenstvovaniya vrachey*. 2016;(4):28-31. (In Russ.)]
21. Михайлов В.П., Кузьмичев А.А., Ковтун М.В., Полосухин А.Д. Миофасциальные болевые синдромы и возможности их немедикаментозной коррекции // Хирургия позвоночника. – 2010. – № 4. – С. 55–60. [Mikhaylov VP, Kuz'michev AA, Kovtun MV, Polosukhin AD. The role of myofascial structures in the development of pain syndromes and their drug-free correction. *Spine surgery*. 2010;(4):55-60. (In Russ.)]

Information about the authors

Igor E. Nikityuk* — MD, PhD, Leading Researcher of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research. The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-5546-2729>. E-mail: femtotech@mail.ru.

Elizaveta L. Kononova — MD, PhD, Senior Research Associate of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research. The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-7624-013X>. E-mail: Yelisaveta@yandex.ru.

Yuriy E. Garkavenko — MD, PhD, D.Sc., Professor of the Chair of Pediatric Traumatology and Orthopedics. North-Western State Medical University n.a. I.I. Mechnikov; Leading Research Associate of the Department of Bone Pathology of The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-9661-8718>. E-mail: yurijgarkavenko@mail.ru.