

·运动人体科学·

## 摆臂技术对无支撑依柳辛转体相姿势控制的影响

梁颖<sup>1</sup>, 王艺兰<sup>1</sup>, Michael Hiley<sup>2</sup>, 彼末一之<sup>3</sup>

(1.安徽师范大学 体育学院, 安徽 芜湖 241003; 2.拉夫堡大学 体育运动与健康科学学院, 英国 拉夫堡 LE11 3TU; 3.早稻田大学 体育科学学院, 日本 所沢 359-1192)

**摘 要:** 通过比较无支撑依柳辛动作转体过程中身体躯干和摆动腿所形成摆动平面的姿势表现和单足支撑的平衡表现, 研究不同摆臂技术对姿势控制能力的影响, 并确定哪种技术会更有利于完成特定姿势的平衡控制。运用动作分析系统对 2 名世界优秀竞技健美操运动员于洋洋和 Suwabe 分别使用对侧摆臂和同侧摆臂技术完成无支撑依柳辛动作进行三维运动学分析, 结果发现: 与同侧摆臂技术比较, 运用对侧摆臂技术运动员在转体相中身体摆动平面更接近去目标矢状面( $P<0.001$ )、摆动腿与支撑腿形成的夹角峰值显著增大( $P<0.01$ )、上体躯干和支撑腿形成的夹角显著减小( $P<0.001$ ); 人体重心和足底压力中心倾斜角在前后方向的摆动范围显著减小( $P<0.001$ ), 在左右方向的摆动范围和校正上均显著减小( $P<0.01$ 、 $P<0.001$ )。研究表明: 运用对侧式摆动技术有利于运动员将身体肢段移动到目标位置, 并保持较好的平衡。

**关 键 词:** 运动生物力学; 运动控制; 无支撑依柳辛; 转体相; 摆臂技术; 姿势控制

中图分类号: G808 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2020)02-0139-06

### Effects of the arm swinging techniques on posture control in the unsupported Ilyushin turning phase

LIANG Ying<sup>1</sup>, WANG Yi-lan<sup>1</sup>, HILEY Michael<sup>2</sup>, KAZUYUKI Kanosue<sup>3</sup>

(1.School of Physical Education, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2.School of Sport, Exercise and Health Sciences, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, UK; 3.Graduate School of Sport Science, Waseda University, Tokorozawa 359-1192, Japan)

**Abstract:** By comparing the posture performance of the swinging plane formed by the torso and the swinging leg and single foot supported balance performance during unsupported Ilyushin turning, the authors studied the effects of different arm swinging techniques on posture control ability, and determined which technique is more conducive to balance control for completing a specific posture. By using the movement analysis system, the authors carried out a 3D kinematic analysis on the Ilyushin movement completed by such 2 excellent competitive aerobic athletes in the world as YU Yang-yang and Suwabe respectively by using the ipsilateral and contralateral arm swinging techniques, and revealed the following findings: as compared to the ipsilateral arm swinging technique, as for the athlete who used the contralateral arm swinging technique in the turning phase, the body swinging plane was closer to the target sagittal plane ( $P<0.001$ ), the peak value of the included angle formed by the swinging leg and the supporting leg increased significantly ( $P<0.01$ ), the included angle formed by the upper torso and the supporting leg decreased significantly ( $P<0.001$ ); as for the inclination angle of the body mass center and sole pressure center, the rang of back and forth swinging decreased significantly ( $P<0.001$ ), the rang and correction of left and right swinging decreased significantly ( $P<0.01$ ,  $P<0.001$ ). The said findings indicate that using the contralateral swinging technique is conducive to the athletes moving the body and limbs to the target position and maintaining better balance.

收稿日期: 2019-06-03

基金项目: 安徽省自然科学基金青年项目(1608085QH175)。

作者简介: 梁颖(1983-), 女, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向: 运动控制。E-mail: chloe\_liangying@163.com

**Key words:** sports biomechanics; movement control; unsupported Ilyushin; turning phase; arm swinging technique; posture control

姿势和运动动作之间相互作用的本质是运动神经科学领域长期悬而未决的问题<sup>[1]</sup>。无支撑依柳辛是艺术体操和竞技健美操项目中使用频率较高的难度动作,尤其在竞技健美操中,以此为根命名的动作最高分值可达 0.9 分,体现运动员的平衡和柔韧素质。转体相是完成无支撑依柳辛动作的关键,运动员从直体单足站立姿势开始,完成垂地劈腿并保持上下颠倒的姿势转体 360 度,因此保持特定姿势和维持动态平衡的稳定性是转体相的中心焦点。然而,整个身体围绕单足进行转体是个特别复杂的动作,比如芭蕾舞中的脚尖旋转,因为影响平衡的肢体调配和重心稳定的两元素同时存在<sup>[2-3]</sup>。那么,直体围绕复合轴转体技术动作中身体姿势和平衡的协调控制呈现什么特征呢?目前对于此类问题的研究成果非常少见。

当今世界重大赛场上流行两种技术用于无支撑依柳辛动作,一种是滑动式,一种是埋入式。前者要求运动员支撑腿对侧肩引领同侧肩,依次贴靠支撑腿内侧进行摆臂完成转体;后者要求运动员双肩同时贴靠支撑腿内侧进行摆臂完成转体。滑动式无支撑依柳辛和埋入式无支撑依柳辛主要区别就在于摆臂技术上,一种是对侧摆臂,一种是同侧摆臂。有研究指出走路时转体的方向不同,身体肢段的空间位置也会不同<sup>[4]</sup>。因此,在动作技能实施过程中,运动员使用不同身体肢段配置完成同一动作会采用不同的姿势控制策略,而这种策略又存在何种程度风险就是一个很值得研究的问题,尤其在围绕混合轴转体过程中,肢段移动到目标位置的策略不同是否影响维持特定姿势的平衡控制。或者说不同的肢段调配是否会影响姿势的稳定性。

Dieterich 等<sup>[5]</sup>在研究中指出维持动作稳定是综合多种感觉运动皮质系统而非仅仅前庭系统完成姿势控制,但是还没有研究证明在维持动力性单足平衡中何种姿势对平衡控制有功能性作用<sup>[6-8]</sup>。尽管目前国外有少数学者已将姿势控制研究转移到简单动作中,比如伸手去抓、拿和举东西,着重探讨了头、躯干、手和膝盖等肢段移动到目标位置的姿势和任务动作中协调对维持平衡的影响。但是,缺乏技能准确性要求的动作,放大了各肢段的自由度,对于对身体肢段移动到目标位置作为独立姿势控制功能的评价上还是存在局限性。因此,研究有技能准确性要求的动力性动作中身体姿势和平衡的协调控制机制,对阐述运动过程中身体各肢段位置和维持身体平衡功能变化规律,提出复杂动力性运动技能学习方法,有重要的理论价值和

现实意义。

根据国际体操联合会竞技健美操规则,成套动作都必须表现出正确的身体姿势(FIG, 2017-2020)。就无支撑依柳辛动作而言,理想的姿势控制是在维持单足平衡的基础上,躯干和摆动腿的摆动平面在人体正中矢状面上同时旋转 360°,否则动作不得分。然而,理论上运用同侧式摆臂技术会使躯干与支撑腿各所在平面之间形成较大夹角,这不仅仅要求较大的髋关节伸展以使其摆动腿停留在矢状面上,同时会为保持平衡带来更大风险。动力性平衡是指调整身体重心(center of mass, CoM)在足底支撑平面内或者足底压力中心内(center of pressure, CoP)而达到稳定状态的能力<sup>[9]</sup>,这种维持稳定平衡的能力主要是依靠肌肉收缩力和协调调节能力<sup>[10]</sup>,大脑中枢神经系统会针对不同静力性或动力性任务采取不同神经支配策略来维持身体平衡<sup>[11]</sup>。Horak 等<sup>[12]</sup>曾提出动力性动作任务下的身体平衡是需要前馈控制的参与<sup>[12]</sup>,有了前馈控制,姿势干扰才会被预测,引发预见性姿势调整来维持其稳定性<sup>[13]</sup>。然而,不同技术任务下对同一动作的运动员身体呈现何种平衡控制特征目前还没有被广泛研究。

因此,本研究目的是通过比较摆动平面(躯干和摆动腿)的姿势表现和单足转体过程中的平衡表现研究不同摆臂技术对无支撑依柳辛动作摆动相姿势控制的影响,并确定哪种技术会造成较少的姿势偏差以获得更好的平衡,即更有利于特定姿势的平衡控制。本研究假设,对侧式摆臂技术在维持特定姿势的表现上要优于同侧式摆臂技术,同时对侧式摆臂技术对动力性平衡的影响要小于同侧式摆臂技术。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 实验对象

于洋洋:世界冠军(有氧舞蹈、有氧踏板和团体项目),中国健美操国家队队员,主要竞赛项目是女子单人和混合双人。

Kazuya Suwabe:亚洲冠军(男子单人项目),日本健美操国家队队员,主要竞赛项目是男子单人和混合双人。

两名运动员在竞技健美操领域中均以卓越的专项柔韧素质和平衡素质著称,比赛套路中一直有采用以无支撑依柳辛为根命名演化的动作,成功率很高。

实验程序获得早稻田大学体育科学人类研究伦理审查会的同意。

### 1.2 实验仪器

实验运用配有 8 个高速摄像头的动作分析系统 (Motion Analysis Corp., Santa Rosa, CA) 对两名优秀运动员各运用对侧摆臂和同侧摆臂技术完成无支撑依柳辛动作进行拍摄, 采样频率 1 000 Hz。根据人体骨性标志, 在受试者身上贴附 45 个反光球, 如图 1 所示<sup>[14]</sup>, 赤脚站在 1 台 Kistler 三维测力台上完成动作, 采样频率 200 Hz。

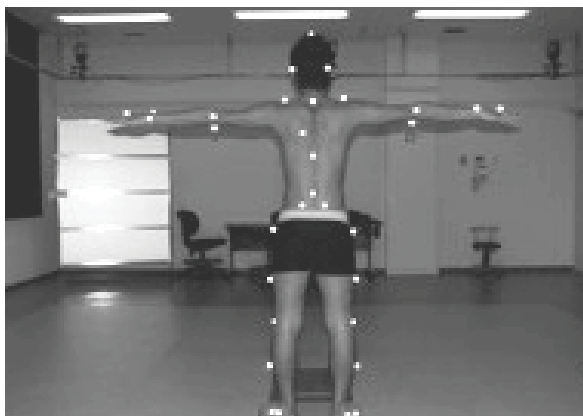


图 1 受试者身体上附着反光球的位置示例

### 1.3 实验场地与控制

于洋洋的实验是在北京体育大学科研中心完成; Kazuya Suwabe 的实验是在早稻田大学运动人体科学实验室完成。两次实验的前期准备、操作、记录均为相同人员完成。

### 1.4 实验过程

#### 1) 实验前准备。

准备实验器材, 调试实验仪器; 向受试者讲解实验流程、注意事项, 签署实验知情同意书; 引导受试者进行中强度慢跑热身、拉伸, 循序渐进进行专项准备活动; 贴附反光球。

#### 2) 实验。

要求受试者目视前方, 静止站在测力台前, 听到 motion 系统数据收录指令后, 上步至测力台上完成动作; 完成动作过程中要求受试者尽自己最大能力维持平衡, 并在动作完成后保持安静状态直至数据收录结束。测试 10 次, 每次动作之间间歇 30 s。

### 1.5 数据分析

由竞技健美操国际级裁判根据视频选取 6 次完美完成的动作进行数据解析。数据指标选取摆动平面角 (身体摆动平面和目标矢状面的夹角)  $\alpha$ 、摆动角 (摆动腿和支撑腿的夹角)  $\beta$ 、躯干角 (躯干和支撑腿的夹角)  $\gamma$ 、CoM 和 CoP 倾斜角在左右方向和前后方向的移动范围  $\eta$  和  $\theta$  (见图 2、3)<sup>[15]</sup>。

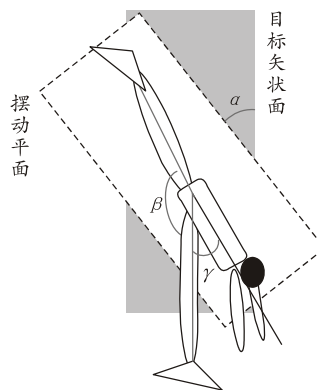


图 2 摆动平面角度的定义

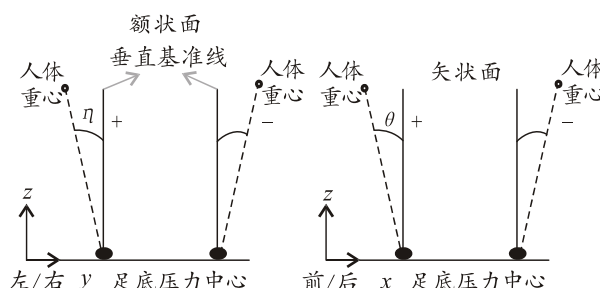


图 3 CoM/CoP 倾斜角在左右和前后方向上的定义

## 2 结果与分析

### 2.1 转体相姿势调整对比

由表 1 可以看出, 运用对侧式摆动技术的运动员在转体相中其摆动平面更靠近目标矢状面, 同侧式摆动技术下运动员身体摆动平面与目标矢状面的夹角平均约  $75.7^\circ$ , 相比较对侧式下的  $64.9^\circ$ , 偏大约  $11^\circ$ ; 转动相中两种摆动技术下的摆动腿和支撑腿之间的最大角度也存在非常显著性差异, 同侧式是  $164.8^\circ$ , 较对侧式  $169.2^\circ$  偏小  $4.4^\circ$ ; 同时, 上体躯干与支撑腿之间的夹角在两种摆动技术下也存在非常显著性差异, 同侧式是  $29.7^\circ$ , 相比较对侧式下的  $18.2^\circ$  偏大约  $11.5^\circ$ 。

表 1 姿势角 ( $\bar{x} \pm s$ ) ( $^\circ$ )

姿势角		对侧式	同侧式	<i>P</i>
摆动平面角	$\alpha$	$64.9 \pm 1.6$	$75.7 \pm 1.5$	0.000
最大摆动角	$\beta$	$169.2 \pm 1.1$	$161.8 \pm 2.2$	0.002
最小躯干角	$\gamma$	$18.2 \pm 0.8$	$29.7 \pm 1.2$	0.000

### 2.2 转体相平衡调节的对比

图 4 是不同摆臂技术下运动员在转体相中身体重心和足底压力中心在左右(前后)方向上随时间变化的轨迹波动图。在左右方向上, 两种技术下的平衡调整明显, 但呈现不一样特征。运用对侧式技术的运动员身体质心波动幅度较大于足底压力中心, 而运用同侧式技术的运动员足底压力中心轨迹波动较明显。在前后方向上, 运用对侧式技术的运动员身体质心和足底

压力中心轨迹随时间的波动幅度极为相近,而运用同侧式技术的运动员足底压力中心的轨迹在转动相后半部分的调整更为明显。

由表 2 可以看出,运用两种摆动技术的运动员在左右摆动范围上无显著性差异,但运用对侧式摆动技

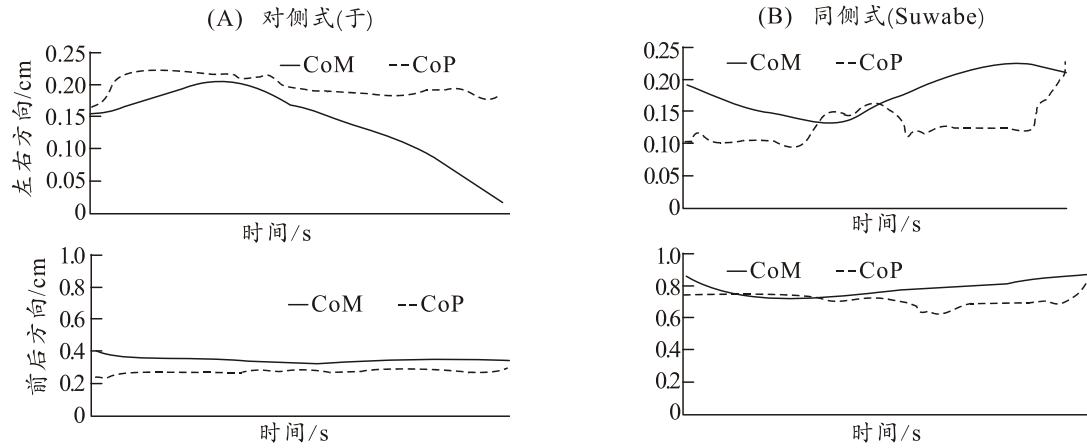


图 4 对侧式(A)和同侧式技术(B)转体人体重心轨迹波动曲线

摆动范围和校正角度	方向	倾斜角 ( $\bar{x} \pm s$ ) ( $^{\circ}$ )		$P$
		对侧式	同侧式	
摆动范围	$\eta$ (左右)	9.2±0.3	9.2±4.3	0.981
	$\theta$ (前后)	8.5±0.3	12.2±1.2	0.002
校正角度	$\delta$ (左右)	19.3±2.1	25.0±3.7	0.009
	$\phi$ (前后)	18.8±0.6	32.8±4.4	0.000

### 3 讨论

姿势控制系统有两个主要功能:(1)有反重力的功能,从而建立姿势;同时,身体平衡也依靠这种反重力的功能,在静态条件下要求重心投影必须保持在支撑表面里。(2)作为一个对外部世界进行感知和反应的参考系(身体肢段比如头、躯干或胳膊的位置和方向可以形成一个参考系,用于计算外部目标位置以及组织身体移动到这些目标)。也就是说,姿势控制的目的是在重力环境中维持平衡和方向<sup>[16]</sup>。体操等技巧类项目运动员被证实具有优秀的平衡能力,在动作表演过程中可以灵活地、稳定地移动他们的重心完成动作。然而,如何提高运动和感觉功能来提高动力平衡目前还没有确定。Hrysomallis 在研究中推测专项运动神经适应性有利于肢体间的协调运动,可以更有效和更稳定地完成动作<sup>[17]</sup>。许多之前关于运动技能学习的研究指出,人在完成专门动作中的注意力将决定怎样流畅地、一致地完成动作,产生怎么样准确的效果,笼统地说就是决定怎么样表现好一个运动技能<sup>[18]</sup>。因此,不同注意力下完成同一运动技能而采用的姿势控制策略就非常值得研究。

本实验 2 名优秀运动员运用不同运动技术完成同

侧式摆动技术的运动员足底压力中心的轨迹在转动相后半部分的调整更为明显。与运用同侧式摆动技术的运动员比较,运用对侧式摆动技术的运动员在前后方向上的摆动范围和校正度数上差异显著,分别偏大 3.7° 和 14°。

一运动技能,裁判根据临场经验均判得分,然而经运动生物力学分析得出有趣结果。垂地劈腿是无支撑依柳辛在转体相中需要重点保持的姿势,根据 FIG 竞技健美操规则(2017—2020 年)两腿间最低完成开度需要达到 170°,2 名运动员的柔韧性都是优秀的,尤其日本男运动员 Suwabe 以柔韧性出名,然而其在转体相中的两腿开度只有约 165°。造成这一结果的原因有两种假设,一是生理性柔韧不足,二是技术限制了柔韧动作的发挥。显然他属于后者。有研究指出当重心必须移动很快时人体会使用髋关节策略来维持身体平衡,即在髋关节处施加一个力矩从而迅速移动人体重心<sup>[19-20]</sup>。此外理论上,运用同侧式摆臂技术,即支撑腿同侧肩引领上体躯干开始转体,那么上体躯干不可避免地和下肢形成一定夹角;而运用对侧式摆臂技术,即支撑腿异侧肩引领上体躯干开始转体,通过依次划肩进行转体,基于生理构造的限制上体躯干与下肢还是会形成一定夹角,但较同侧式要小。实验证明两种技术下运动员最小躯干角的差异性显著,相差约 12°。转体相中另一重要的姿势考量指标是摆动腿形成的摆动平面是否停留在初始地目标矢状面上,表 1 显示运用同侧式的 Suwabe 在转体相中下肢摆动平面与目标矢状面形成的夹角大于于洋洋近 11°,约等于两者上体躯干和支撑腿形成的角度差。因此,从特定身体肢段移动至其目标位置的准确性角度上来说,运用对侧式摆动技术运动员在维持垂地劈腿姿势的转体效果要优于同侧式摆臂技术运动员,对侧式摆动技术能够使运动员在转动相中身体摆动平面更靠近目标矢状面,

这和本实验的假设是一致的。

平衡是人综合视觉、本体感觉和前庭感觉系统的反馈信息<sup>[10, 20-21]</sup>, 迅速、连续、协调地完成神经肌肉收缩以维持人体重心垂直于支撑地面的过程<sup>[22]</sup>。身体重心或足底压力中心的相关指标一直被运用来评价静立性和动力性平衡能力。姿势控制的效果取决于人体重心和足底支撑面的关系<sup>[23]</sup>。有研究指出, 人体重心受到体格的影响<sup>[24]</sup>, 高个人的重心较矮个人高, 即使两种人重心摆动相同大小, 得到的结论也是不同的, 因此用人体重心来评价平衡能力就有了限制。Winter DA<sup>[9]</sup>研究指出足底压力中心可以给研究平衡控制的过程中提供新的见解, 因为其直接关联于人体重心的运动。然而, 人体体格和足的大小在对组间进行比较得出的结果影响较大<sup>[24-25]</sup>。因此, Lee & Zhou<sup>[15]</sup>研究出用CoM\_CoP 倾斜角来研究人维持动力性平衡的能力。

实验中运用不同摆臂技术运动员在左右方向表现出的平衡调整范围上无显著性差异, 然而运用同侧式摆动技术运动员在维持平衡状态的身体摇摆校正上明显大于运用对侧式摆动技术运动员, 这就是说其实施了较多控制才能保持较好的平衡状态, 也证明此项技术对其左右方向的身体控制带来较大的平衡干扰。运动员在前后方向表现出的平衡控制差异显著, 运用同侧式摆动技术运动员前后摆动幅度较大, 这进一步证明了该运动员运用髋关节策略维持身体平衡。正如Horak<sup>[12]</sup>提出移动髋关节产生剪切力, 从而在前后方向上移动身体质心。当人体在运动时的动态状态下, 工作肌肉产生的力和动量会随着动作的变化而调整<sup>[26-27]</sup>。从动力学角度出发, 双臂同时快速下摆在相同时间内产生的肌肉收缩力要大于单臂快速下摆, 人体所受的冲量也较大, 那么需要保持身体处于稳定状态抵抗破坏平衡冲击力带来的影响也较大。CoM\_CoP 倾斜角的校正指标可以看出, 运用对侧式摆臂技术运动员在前后方向的平衡控制上优于运用同侧式摆臂技术运动员, 符合本研究的假设即对侧式摆臂技术对动力性平衡的影响要小于同侧式摆臂技术。

运动技能的习得和表现需要运动员对其实施有效的姿势控制, 比如职业芭蕾舞选手在成套编排中体现身体极致位置和姿势上<sup>[28]</sup>, 同时需要在正确的方向和面对镜子、舞台和观众的空间位置上完成, 展示高水平的空间方位感, 这主要依靠训练经验和精细运动协调性<sup>[29]</sup>。Teasdale<sup>[30]</sup>在研究中提出, 姿势控制是中枢神经系统在综合多种感觉信息分析整合后下达指令, 通过适宜的肌肉协同作用来维持平衡。无支撑依柳辛动作要求运动员在单足支撑下围绕矢状轴和垂直轴快速地进行转体, 在转体过程中既需要稳定姿势也需要

维持身体平衡。研究者们普遍认为, 快速动作的控制是开回路控制, 即利用前馈控制预先规划运动指令, 因为运动感觉反馈回路太慢不能实施有效调整。前馈控制是涉及在动作开始前肌肉的激活以及这些肌肉 $\gamma$ 运动神经元活动时肌梭敏感性的增加, 提高了反射性神经肌肉控制能力<sup>[31]</sup>。因此, 在对复杂动力性快速动作的训练过程中, 教练应该决定哪一种技术方法更有利, 并且运用这个知识制定训练计划以提高运动员的运动成绩。同侧式摆臂技术在动作实施过程中, 运动员在前后、左右方向上均进行较大的姿势调整, 感知觉反馈信息在维持姿势的稳定中会重新赋权<sup>[32-33]</sup>, 小脑的平衡能力会被不同策略分散<sup>[34]</sup>, 运动损伤的风险也相对较大。Hrysonallis<sup>[35, 17]</sup>研究证明, 维持平衡能力和运动损伤的风险关系甚为密切。未来研究将测量人体围绕矢状轴和垂直轴旋转的力矩, 也许可以提供更多信息来评价摆臂技术对无支撑依柳辛动作转体相姿势控制的影响。

本研究是针对身体围绕复合轴转体的动力性动作, 从姿势控制的两个主要功能出发研究不同转体技术在转体相中身体肢段的有效移动和维持平衡的协调控制策略。研究结果表明, 运用对侧式摆动技术, 即运动员支撑腿对侧肩引领同侧肩, 依次贴靠支撑腿内侧进行摆臂完成转体的技术, 有利于运动员将身体肢段移动到目标位置, 并保持较好的平衡。

## 参考文献:

- [1] IVANENKO Y, GURFINKEL V S. Human postural control [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, 12(3): 1-9.
- [2] LAWS K. The slowing of pirouettes[J]. *Kinesiology Medicine Dance*, 1992, 15(1): 72-80.
- [3] LAWS K. Momentum transfer in dance movement [J]. *Medical Problems of Performing Artists*, 1998, 13: 136-145.
- [4] TAYLOR J L. Independent control of voluntary movements and associated anticipatory postural responses in a bimanual task[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2005, 116(9): 2083-2090.
- [5] DIETERICH M, BEBSE S, LURZ S, et al. Dominance for vestibular cortical function in the non-dominant hemisphere [J]. *Cerebral Cortex*, 2003, 13(9): 994-1007.
- [6] GOLOMER E, DUPUI P, GOLOMER E. Dynamic balance sensory motor control and symmetrical or asymmetrical equilibrium training[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(2): 317-324.
- [7] GOLOMER E, ROSEY F, DIZAC H, et al. The influence of classical dance training on preferred supporting leg and

- whole-body turning bias[J]. *Laterality*, 2009, 14(2): 165-177.
- [8] GUILLOU E, DUPUI P, GOLOMER E. Dynamic balance sensory motor control and symmetrical or asymmetrical equilibrium training[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(2): 317-324.
- [9] WINTER D A. Human balance and posture control during standing and walking [J]. *Gait & Posture*, 1995, 3(4): 193-214.
- [10] HORAK F B. Clinical measurement of postural control in adults[J]. *Physical Therapy*, 1987, 67(12): 1881-1885.
- [11] HATZITAKI V, ZLSI V, KOLLIAS I, et al. Perceptual-motor contributions to static and dynamic balance control in children[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2002, 34(2): 161-170.
- [12] HORAK F B, NASHNER L M. Central programming of postural movements: Adaptations to altered support surface configurations[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1986, 55: 1369-1381.
- [13] MASSION J. Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination[J]. *Progress in Neurobiology*, 1992, 38: 35-56.
- [14] HAHN M E, CHOU L S. Age-related reduction in sagittal plane center of mass motion during obstacle crossing [J]. *Journal of Biomechanics*, 2004, 37(6): 837-844.
- [15] LEE H J, ZHOU L S. Detection of gait instability using the center of mass and center of pressure inclination angles[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2006, 87(4): 569-575.
- [16] HRYDOMALLIS C. Balance ability and athletic performance[J]. *Sports Medicine*, 2011, 41(3): 221-232.
- [17] GABRIELE W. Attention and motor skill learning [M]. Champaign, IL: Human Kinetics, 2007.
- [18] HORAK F B, KUO A. Postural adaptation for altered environments, tasks and intentions[M]//biomechanics and neuronal control of posture and movement. New York: Springer, 2000, 267-281.
- [19] HORAK F B. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls?[J]. *Age and Ageing*, 2006, 35(2): ii7-ii11.
- [20] MASSION J. Postural control system[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1994, 4(6): 877-887.
- [21] BALESTRUCCI P, DAPRATI E, LACQUANITI F, et al. Effects of visual motion consistent or inconsistent with gravity on postural sway[J]. *Experimental Brain Research*, 2017, 235(7): 1999-2010.
- [22] NASHNER L M. Practical biomechanics and physiology of balance[M]//JACOBSON G P, NEWMAN C W, KARTUSH J M. Handbook of balance function testing. San Diego (CA): Singular Publishing Group, 1997, 261-279.
- [23] HASE K, STEIN R B. Turning strategies during human walking [J]. *Journal of Neurophysiology*, 1999, 81(6): 2914-2922.
- [24] BERGER W, TRIPPEL M, DISCHER M, et al. Influence of subjects' height on the stabilization of posture[J]. *Acta Oto-Laryngologica*, 1992, 112(1): 22-30.
- [25] ALLARD P, NAULT M L, HINSE S, et al. Relationship between morphologic somatotypes and standing posture equilibrium[J]. *Annals of Human Biology*, 2001, 28(6): 624-633.
- [26] HIRSCHFELD H, FORSSBERG H. Phase dependent modulations of anticipatory postural activity during human locomotion[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1991, 66(1): 12-19.
- [27] PAI Y C, PATTON J. Center of mass velocity position predictions for balance control[J]. *Journal of Biomechanics*, 1997, 30(4): 347-354.
- [28] LAI J C, KRUSE D W. Assessing readiness for en pointe in young ballet dancers[J]. *Pediatric Annals*, 2016, 45(1): 21-25.
- [29] CROTTS D, THOMPSON B, NAHOM M, et al. Balance abilities of professional dancers on select balance tests[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1996, 23(1): 12-17.
- [30] TEASDALE N, LAJOIE Y, BARD C, et al. Cognitive process involved for maintaining postural stability while standing and walking[M]. *Sensorimotor Impairment in the Elderly*, 1993: 157-168.
- [31] FISCHER D V. Neuromuscular training to prevent anterior cruciate ligament injury in the female athletes [J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2006, 28(5): 44-54.
- [32] PETERKA R J, LOUGHLIN P J. Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2004, 91(1): 410-423.
- [33] PETERKA R J, LOUGHLIN P J. Sensorimotor integration in human postural control[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2002, 88(3): 1097-1118.
- [34] 梁颖, 彼末一之. 身体姿势控制的线性和非线性评价[J]. *北京体育大学学报*, 2015, 38(5): 68-71.
- [35] HRYDOMALLIS C. Relationship between balance ability, training and sports injury risk[J]. *Sports Medicine*, 2007, 37(6): 547-556.