

马术运动中骑手核心稳定策略的 IMU 步态适应研究

李 雷¹ 颜中杰¹ 陈欣荣^{2*}

1. 上海大学体育学院, 上海 200444

2. 复旦大学, 上海 200433

[摘要] 本研究基于惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 对马术骑手在不同骑乘步态下的骨盆—躯干稳定性特征进行量化分析, 以期骑手技术训练与科学评估提供客观依据。采用方便抽样方法选取 18 名具有一定骑乘经验的骑手, 在标准马术训练环境中完成步行 (walk)、快步 (trot) 和慢跑 (canter) 三种步态骑乘任务, 通过在骨盆 (L3) 与躯干 (T8) 部位布置 IMU 传感器采集三维加速度与角速度数据, 并提取均方根值 (RMS) 及变异系数 (CV) 等指标表征稳定性特征。结果显示, 不同步态条件下骨盆与躯干稳定性指标均存在显著差异, 随着步态强度增加, RMS 及 CV 呈显著升高趋势 ($P < 0.001$); 跨部位比较发现, 骨盆各项指标均显著高于躯干 ($P < 0.01$), 表明骨盆在骑乘过程中承担主要运动调节功能, 而躯干保持相对稳定。研究认为, 骑乘步态变化对骑手姿势控制具有显著影响, 呈现出“骨盆调节、躯干稳定”的运动控制特征, IMU 技术能够有效实现骑手稳定性的动态监测, 为马术训练优化、伤病预防及技能评估提供了可行路径。

[关键词] 马术; 骑手稳定性; 惯性测量单元; 步态

DOI: 10.33142/jscs.v6i4.20172

中图分类号: G804

文献标识码: A

Research on IMU Gait Adaptation of Rider's Core Stability Strategy in Equestrian Sports

LI Lei¹, YAN Zhongjie¹, CHEN Xinrong^{2*}

1. Physical Education College of Shanghai University, Shanghai, 200444, China

2. Fudan University, Shanghai, 200433, China

Abstract: This study quantitatively analyzes the pelvic trunk stability characteristics of equestrian riders under different riding gaits based on the Inertial Measurement Unit (IMU), in order to provide objective basis for rider technical training and scientific evaluation. Using a convenience sampling method, 18 riders with certain riding experience were selected to complete three gait riding tasks: walk, trot, and canter in a standard equestrian training environment. Three dimensional acceleration and angular velocity data were collected by placing IMU sensors in the pelvis (L3) and torso (T8), and root mean square (RMS) and coefficient of variation (CV) were extracted to characterize stability characteristics. The results showed that there were significant differences in pelvic and trunk stability indicators under different gait conditions. As gait intensity increased, RMS and CV showed a significant upward trend ($P < 0.001$); Cross site comparison revealed that all pelvic indicators were significantly higher than those of the trunk ($P < 0.01$), indicating that the pelvis plays a major role in regulating movement during riding, while the trunk remains relatively stable. Research suggests that changes in riding gait have a significant impact on the posture control of riders, exhibiting motion control characteristics of pelvic adjustment and trunk stability. IMU technology can effectively achieve dynamic monitoring of rider stability, providing a feasible path for optimizing equestrian training, preventing injuries, and evaluating skills.

Keywords: equestrianism; rider stability; inertial measurement unit; gait

引言

马术运动是一项典型的人马协同项目, 骑手需要在马匹运动产生的持续扰动下维持身体稳定并完成动作控制。由于马匹在步行 (walk)、快步 (trot) 和慢跑 (canter) 等不同步态下表现出不同的运动节律和力学特征, 骑手必

须不断调整身体姿态以适应步态变化。因此, 骑乘过程中的稳定控制能力被认为是影响技术表现的重要因素之一。

已有研究表明, 人马之间存在明显的运动耦合关系, 且这种关系会随着步态改变而发生变化^[1,2]。其中, 骨盆位于人体与马体相互作用的关键位置, 不仅承担运动信息

传递功能,也是骑手调整重心和适应马匹运动的重要环节。与此同时,躯干稳定程度会影响身体整体控制效果。相关研究发现,核心稳定能力、柔韧性以及骑乘经验均与骑乘表现存在一定关联^[3,4]。此外,不同技术水平骑手在姿势控制特征方面也存在差异^[5]。然而,目前关于骑手骨盆—躯干系统稳定性的研究仍相对有限,尤其缺乏真实骑乘条件下针对不同步态的量化比较。

近年来,惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)因便携性高、适用于现场测试等特点,被广泛应用于运动学研究。与传统光学动作捕捉系统相比,IMU 更适合获取真实骑乘环境中的连续运动数据,并能够反映身体各部位的动态变化特征^[6]。因此,利用 IMU 研究不同步态下骑手骨盆与躯干的稳定性变化,对于理解骑乘过程中的运动控制规律具有一定意义。

基于此,本研究采用 IMU 对骑手在步行、快步和慢跑三种步态下的骨盆与躯干运动进行测量,通过加速度、角速度及相关波动指标分析不同步态条件下的稳定性特征,为骑姿训练和骑乘技术评价提供参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

采用便利抽样方法招募具有骑乘经验的骑手 18 名,其中男性 10 名、女性 8 名。受试者年龄为(23.4 ± 2.8)岁,身高(173.6 ± 6.5)cm,体重(66.2 ± 7.4)kg,骑龄(3.6 ± 1.2)年,均能够独立完成步行(walk)、快步(trot)和慢跑(canter)骑乘。

纳入标准为:①具备稳定骑乘能力;②近 6 个月内无严重肌肉骨骼损伤;③无神经系统疾病及平衡功能障碍;④自愿参加实验并签署知情同意书。存在急性运动损伤、慢性疼痛影响骑乘表现,未完成测试任务或数据异常者予以排除。

1.2 实验仪器与设备

采用 Xsens MTw Awinda 惯性测量单元(IMU, 荷兰 Xsens 公司)采集运动学数据。设备内置三轴加速度计($\pm 16g$)和三轴陀螺仪($\pm 2000^\circ/s$),采样频率设定为 100 Hz。

为获取骨盆与躯干运动信息,分别在第 3 腰椎(L3)和第 8 胸椎(T8)水平放置传感器。传感器通过弹性绑带固定于体表,测试前完成静态校准及时间同步处理。

1.3 实验设计与测试流程

本采用单组重复测量设计,以骑乘步态(walk、trot、canter)作为实验因素。

实验在 40m×20m 标准室外马术训练场进行。测试用马为 3 匹温血马,年龄 8~12 岁,均经过系统训练且步态稳定,无运动损伤史。

测试前受试者佩戴 IMU 并完成校准,随后进行约 8min 自由骑乘热身。正式测试时,受试者按随机顺序完成三种步态骑乘,每种步态持续 60s,选取中间连续 30s 稳定数据用于分析。各步态重复测试 2 次,结果取平均值。不同步态间安排 3min 休息,以减少疲劳影响。

测试过程中要求受试者保持常规骑姿,即骨盆处于中立位、躯干保持直立、双手持缰并平视前方,避免额外动作干扰数据采集。

1.4 数据处理与稳定性指标提取

采原始数据导入 MATLAB R2023b 进行处理。首先采用四阶 Butterworth 低通滤波器进行滤波,截止频率设为 20Hz。随后提取各步态中连续 30s 稳定阶段数据进行分析。

为评价骨盆—躯干稳定性,计算以下指标:①加速度均方根值(RMS),反映身体振动水平;②角速度均方根值(RMS),反映姿态旋转变化;③变异系数(CV),用于评价信号波动程度;④合加速度(Vector Magnitude),用于描述整体运动强度。各指标分别在骨盆和躯干部位计算,并采用三轴合成值进行分析。

1.5 统计学分析

所有数据均采用 SPSS 27.0 进行统计处理。连续变量以均值±标准差(Mean±SD)表示。统计分析前,先对各变量进行 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 方差齐性检验。结果显示,各项指标均符合正态分布($P>0.05$),满足后续参数检验的前提。

采用单因素重复测量方差分析比较不同步态下各稳定性指标的差异。当总体检验达到显著水平时,进一步采用 Bonferroni 法进行两两比较。显著性水平设定为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 不同步态下骨盆稳定性特征比较

不同骑乘步态下骑手骨盆稳定性指标如表 1 所示。结果显示,随着步态由步行(walk)向快步(trot)及慢跑(canter)过渡,加速度 RMS、角速度 RMS 及变异系数(CV)均呈逐渐升高趋势。

表 1 不同骑乘步态下骑手骨盆稳定性指标

指标	步行	快步	慢跑	F 值	P 值
加速度 RMS (m/s^2)	0.82 ± 0.15	1.46 ± 0.21	1.98 ± 0.27	52.37	<0.001
角速度 RMS ($^\circ/s$)	18.6 ± 3.4	32.8 ± 5.1	45.2 ± 6.3	47.15	<0.001
CV	0.21 ± 0.04	0.29 ± 0.05	0.35 ± 0.06	31.84	<0.001

在加速度 RMS 方面, 步行阶段为 $(0.82 \pm 0.15) \text{ m/s}^2$, 快步阶段显著升高至 $(1.46 \pm 0.21) \text{ m/s}^2$, 慢跑阶段进一步升高至 $(1.98 \pm 0.27) \text{ m/s}^2$ 。重复测量方差分析结果表明, 不同步态间差异具有统计学意义($F=52.37, P<0.001$)。事后比较显示, 各步态间差异均具有统计学意义($P<0.05$)。

角速度 RMS 与 CV 指标变化趋势一致, 均随步态强度增加而显著升高 ($P<0.001$)。

为更直观展示骨盆稳定性在不同步态下的变化趋势, 特绘制如图 1 所示。

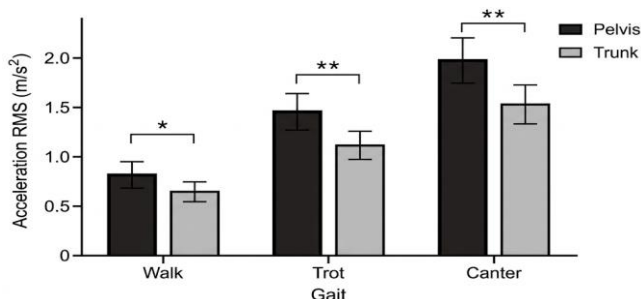


图 1 不同步态下骨盆稳定性指标变化

2.2 不同步态下躯干稳定性特征比较

不同骑乘步态下骑手躯干稳定性指标如表 2 所示。总体来看, 躯干稳定性变化趋势与骨盆一致, 但数值整体较低。在加速度 RMS 方面, 步行、快步和慢跑分别为 $(0.65 \pm 0.12) \text{ m/s}^2$ 、 $(1.12 \pm 0.18) \text{ m/s}^2$ 和 $(1.54 \pm 0.23) \text{ m/s}^2$, 差异具有统计学意义 ($F=44.26, P<0.001$)。角速度 RMS 与 CV 指标同样表现出显著升高趋势 ($P<0.001$)。

表 2 不同骑乘步态下骑手躯干稳定性指标

指标	步行	快步	慢跑	F 值	P 值
加速度 RMS (m/s^2)	0.65 ± 0.12	1.12 ± 0.18	1.54 ± 0.23	44.26	<0.001
角速度 RMS ($^\circ/\text{s}$)	14.2 ± 2.9	25.6 ± 4.3	36.7 ± 5.5	41.73	<0.001
CV	0.18 ± 0.03	0.25 ± 0.04	0.31 ± 0.05	28.19	<0.001

为直观比较躯干在不同步态下的稳定性变化, 特绘制如图 2 所示。

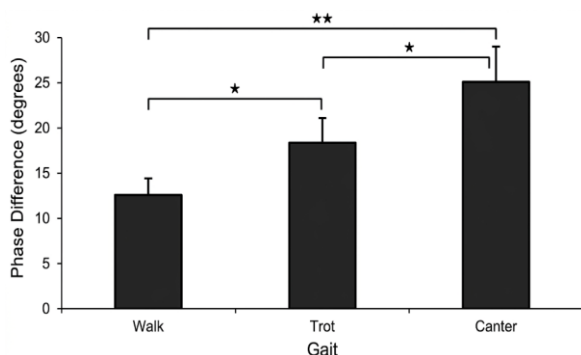


图 2 不同步态下躯干稳定性指标变化

2.3 骨盆与躯干稳定性差异比较

为进一步分析不同身体部位在骑乘过程中的稳定控制特征, 对骨盆与躯干主要指标进行对比分析。如表 3 所示, 在所有步态条件下, 骨盆的加速度 RMS 与角速度 RMS 均显著高于躯干 ($P<0.01$)。

在步行、快步及慢跑阶段, 骨盆加速度 RMS 分别比躯干高约 26.2%、30.4%和 28.6%, 说明骨盆在骑乘过程中承担更多运动调节任务。

表 3 骨盆与躯干主要指标对比分析表

步态	部位	加速度 RMS	角速度 RMS	CV
步行	骨盆	0.82 ± 0.15	18.6 ± 3.4	0.21 ± 0.04
	躯干	0.65 ± 0.12	14.2 ± 2.9	0.18 ± 0.03
快步	骨盆	1.46 ± 0.21	32.8 ± 5.1	0.29 ± 0.05
	躯干	1.12 ± 0.18	25.6 ± 4.3	0.25 ± 0.04
慢跑	骨盆	1.98 ± 0.27	45.2 ± 6.3	0.35 ± 0.06
	躯干	1.54 ± 0.23	36.7 ± 5.5	0.31 ± 0.05

此外, 骨盆 CV 值在各步态下均高于躯干, 提示其波动更大, 而躯干保持相对稳定状态。为进一步展示骨盆与躯干在不同步态下的变化趋势, 特绘制如图 3 所示。

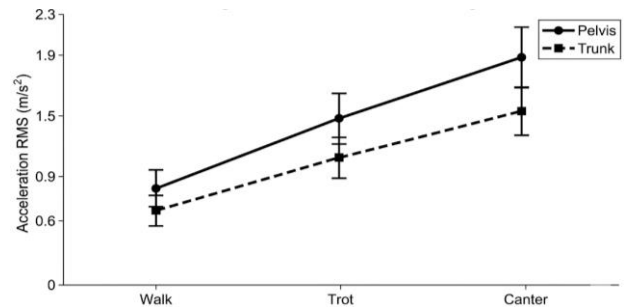


图 3 骨盆与躯干稳定性对比

3 讨论

本研究基于惯性测量单元 (IMU) 对马术骑手在步行 (walk)、快步 (trot) 和慢跑 (canter) 三种典型骑乘步态下的骨盆与躯干稳定性进行了量化分析, 结果显示: 不同步态下骑手骨盆和躯干的稳定性指标均存在显著差异, 且随着步态强度增加, 加速度 RMS、角速度 RMS 及变异系数 (CV) 均呈上升趋势。此外, 骨盆在各步态下的波动幅度明显大于躯干, 体现出骑乘过程中骨盆承担主要运动调节任务、躯干相对稳定的控制策略。以下从机制解释、与现有文献对比、训练与实践意义以及局限性四个方面进行深入讨论。

3.1 骨盆-躯干稳定性随步态变化的机制分析

本结果显示, 随着骑乘步态由步行向快步和慢跑过渡, 骨盆与躯干的稳定性指标均呈上升趋势。步态强度增加后, 马匹运动产生的垂直冲击和身体摆动增强, 骑手需要通过

持续调整姿态维持平衡,因此身体各部位的运动波动相应增大。

从不同部位来看,骨盆指标增幅高于躯干。骨盆位于人马运动信息传递的关键环节,在适应马匹运动节律、调节身体重心以及缓冲外部扰动过程中承担主要作用,因此对步态变化更为敏感。相比之下,躯干波动相对较小,说明骑手在骑乘过程中倾向于保持上身稳定,而将更多调整任务集中于骨盆区域。

本研究还发现, CV 随步态增强而增加,表明高强度步态下姿态控制波动加大。特别是在慢跑阶段,骨盆 CV 达到最高水平,说明随着马匹运动速度和扰动强度提高,骑手需要进行更频繁的姿态修正。该结果提示,骑乘稳定性的维持不仅依赖身体力量水平,还与运动感知、神经肌肉协调以及实时调节能力密切相关。

3.2 骨盆与躯干稳定性差异的解释

跨部位比较结果显示,骨盆各项波动指标整体高于躯干,说明两者在骑乘过程中承担着不同的功能角色。骑手需要在马匹持续运动产生的扰动条件下维持身体平衡,其中骨盆处于人与马接触和力量传递的重要位置,不仅负责适应马匹步态变化,还参与身体重心调节和运动缓冲。因此,相较于躯干,骨盆更容易表现出较大的运动波动。

躯干虽然同样受到马匹运动影响,但其主要作用在于维持上半身姿态稳定,并为头部和上肢动作提供相对稳定的基础。研究结果显示,躯干波动水平始终低于骨盆,表明骑手在骑乘过程中存在一定程度的分层控制特征,即通过骨盆区域完成主要适应性调整,而躯干则保持相对稳定状态。

这种差异在快步阶段表现得更为明显。由于快步具有较高的垂直位移和冲击频率,骨盆需要持续适应来自马体的运动输入。当骨盆能够有效完成缓冲和调节时,部分扰动可在骨盆区域被吸收,从而减少向上传递的运动波动;反之,则可能导致躯干稳定性下降并影响整体骑姿。已有研究也发现,高水平骑手通常表现出较好的骨盆控制能力和更稳定的躯干姿态,其运动调节过程呈现出较高的协调性。由此可见,骨盆与躯干之间并非独立工作,而是通过协同配合共同完成骑乘过程中的姿态控制任务。

3.3 与现有文献的对比

本研究结果与已有基于 IMU 的骑手运动学研究高度一致。Münz 等^[2]采用惯性传感器测量骨盆运动,发现骨盆在快步和慢跑阶段的加速度和角速度显著高于步行阶段;Baxter 等^[5]研究指出,不同技术水平骑手在快步动作中骨盆和躯干的波动特征存在显著差异,高水平骑手的躯

干更稳定,骨盆波动更可控;Olivier 等^[4]也发现骑手头-躯干协调能力在高强度步态中对姿势稳定性具有重要作用。综合上述文献,本研究进一步验证了骨盆-躯干分层控制模型,并在国内骑手样本中提供了客观量化证据。

值得注意的是,本研究的骨盆加速度 RMS 在慢跑阶段达到 1.98m/s^2 ,相较于 Hobbs 等^[3]报道的平均 1.85m/s^2 略高,这可能与受试者骑龄较短、马匹个体差异及实验场地条件有关。但整体变化趋势和差异模式高度一致,说明结果具有生物学合理性和可重复性。

3.4 研究结果的应用意义

本研究利用 IMU 对骑手骨盆与躯干稳定性进行了量化分析,为骑乘训练提供了客观评价依据。结果显示,不同步态条件下稳定性特征存在明显差异,其中快步和慢跑阶段的波动水平较高,提示该阶段对骑手姿态控制能力要求更高。训练过程中可结合 RMS、CV 等指标,了解骑手在不同步态下的控制表现,并针对骨盆稳定性、核心控制能力等方面进行调整。

同时,骨盆波动幅度高于躯干,说明其在适应马匹运动和维持身体平衡过程中发挥重要作用。对相关指标进行持续监测,有助于发现骑手在姿态控制中的薄弱环节,并为训练效果评价和技术改进提供参考。

4 研究结论

本基于 IMU 采集的骨盆与躯干运动学数据,本研究比较了骑手在步行、快步和慢跑条件下的稳定性特征。结果显示,随着步态强度增加,骨盆与躯干的加速度及角速度波动均呈上升趋势,其中快步和慢跑阶段变化更为明显。相比躯干,骨盆在各步态下表现出更大的运动波动,说明其在适应马匹运动扰动、调节身体重心及缓冲冲击过程中承担了更主要的控制任务。整体来看,骑手稳定性受步态变化影响明显,不同身体环节在姿态控制中的功能分工也存在差异。IMU 能够较好地反映骑乘过程中的动态稳定特征,可为骑手训练监测与技术评估提供客观参考。

[参考文献]

- [1]Münz A,Eckardt F,Witte K.Horse-rider interaction in dressage riding[J].Human Movement Science,2014(33): 227-237.
- [2]Münz A,Eckardt F,Heipertz-Hengst C,Peham C,Witte K.A preliminary study of an inertial sensor-based method for the assessment of human pelvis kinematics in dressage riding[J].Journal of Equine Veterinary Science,2013,33 (11):950-955.
- [3]Hobbs SJ,Baxter J,Broom L,Rossell LA,Sinclair

J,Clayton HM.Posture, flexibility and grip strength in horse riders[J].Journal of Human Kinetics,2014,42(1):113-125.

[4]Olivier A,Faugloire E,Lejeune L,Biau S,Isableu B.Head Stability and Head-Trunk Coordination in Horseback Riders: The Contribution of Visual Information According to Expertise[J].Frontiers in Human Neuroscience,2017(11):11.

[5]Baxter J,Hobbs SJ,Alexander J,St George L,Sinclair J,Chohan A,Clayton HM.Rider Skill Affects Time and Frequency Domain Postural Variables When Performing Shoulder-in[J].Journal of Equine Veterinary Science,

2022(109):103805.

[6]Creca CM,Peştean CP.Inertial Sensor Technologies— Their Role in Equine Gait Analysis, a Review[J]. Sensors,2023,23(14):6301.

作者简介：李雷（2001—），男，汉族，硕士在读，上海大学体育学院，研究方向：体育教学与训练；颜中杰（1969—），男，汉族，博士，教授，上海大学体育学院，研究方向：体育教学与训练；*通讯作者：陈欣荣（1982—），男，汉族，博士，教授，复旦大学，研究方向：人工智能技术。