

## 《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的作用

作者：路晓漫<sup>†</sup> 杜依珂<sup>†</sup> 叶文龙 王海飞 孟鲁 周梁

### 第一轮

#### 审稿人 1 意见：

该研究利用拍子同步范式，探究了生物运动的整体构型信息与局部运动信息对生物运动拍子同步的影响。结果发现整体构型信息对生物运动拍子同步的关键作用，而局部运动信息则在生物运动保持整体构型时才发挥作用。该研究为我们提供了有关生物运动加工机制的新的视角。但还存在以下问题需要修改：

**意见 1：**“由此可见，人类对生物运动的加工具有与普通客体不同的优势，”在上文的描述中并未提及生物运动加工相比普通客体的优势。

**回应：**非常感谢审稿专家的反馈，此处确实有所疏漏。由于相应段落中并未论证生物运动加工与普通客体加工的差异，得到“人类对生物运动的加工具有与普通客体不同的优势”这一结论是不合理的。

作为对上文的总结，我们将这句话改为“由此可见，生物运动加工是人类一项重要的基本认知能力，在个体发展中表现出早期出现、快速发展和长期保持的特征”。见修改稿第 18 页第 23 行-第 18 页第 24 行。

**意见 2：**“以往研究表明生物运动的整体构型信息或局部运动信息会对生物运动的探测、辨别以及其他的知觉过程产生作用”，这句话表述得不够清晰。

**回应：**感谢审稿专家的反馈，此处确实未表述清楚，将此句话改为“生物运动的整体构型及局部运动特征都会影响相关知觉过程”。见修改稿第 20 页第 3 行-第 20 页第 4 行。

**意见 3：**“完备的整体构型信息将激活大脑中关于人体运动的既存模版用于组织和预测局部运动信息”，引言部分的这个观点是否有前人文献支持？

**回应：**感谢审稿专家的反馈。以上观点有以下研究支持：

(1). Lange 等人(2006)的研究中指出，即使在缺乏局部运动信号的情况下，观察者依然能够凭借全局形态感知到生物运动，表明完备的整体构型信息能够激活大脑中已存储的运动模板，并通过全局形态分析实现模板匹配(Lange et al., 2006)。这支持“完备的整体构型信息将激活大脑中关于人体运动的既存模板”。

(2). 预测编码框架进一步从理论层面支持了该观点：大脑通过内部“生成模型”进行贝叶斯推断，而这种模型可涵盖对运动规律(如轨迹、旋转)的表征(Adams et al., 2013; Keller & Mrsic-Flogel, 2018)。具体到人体运动领域，大脑中预存的运动模版作为先验信息，会持续生成对局部动态运动输入的预测并组织感知过程，这为“激活的既存模版用于组织和预测局部运动信息”提供了理论支撑。

需要说明的是，由于结构调整、修改文稿中这一句话已被删除。而在第 21 页第 9 行到 12 行表达此含义：“在贝叶斯感知框架下，完整的人体构型能够激活大脑中储存的生物运动模板，形成关于运动时间结构的强先验期望(Lange et al., 2006; Lange & Lappe, 2006)，这一

先验为观察者提供用于组织和预测局部运动信息的框架(Adams et al., 2013; Keller & Mrsic-Flogel, 2018)”，并在修改稿文献列表中加入相应参考文献。

参考文献：

Lange, J., Georg, K., & Lappe, M. (2006). Visual perception of biological motion by form: A template-matching analysis. *Journal of Vision*, 6(8), 6.

Lange, J., & Lappe, M. (2006). A model of biological motion perception from configural form cues. *Journal of Neuroscience*, 26(11), 2894–2906.

Adams, R. A., Shipp, S., & Friston, K. J. (2013). Predictions not commands: active inference in the motor system. *Brain Structure and Function*, 218(3), 611–643.

Keller, G. B., & Mrsic-Flogel, T. D. (2018). Predictive processing: a canonical cortical computation. *Neuron*, 100(2), 424–435.

**意见 4:** 实验方法中提到的“正式实验部分包含 16 个试次”，指的是每种视觉运动刺激条件下各 16 个试次？需要表述清楚。

**回应:** 非常感谢审稿专家的反馈，此处确实未表述清楚。将文中内容修改为“正式实验部分，每种视觉运动刺激条件组块中各包含 16 个试次”。见正文第 26 页第 12 行。

**意见 5:** 请描述清楚拍子同步任务，是根据步态周期还是脚部周期。

**回应:** 非常感谢审稿专家的重要指正。经过仔细检查，我们发现在原文中确实存在脚步周期和步态周期概念混用的问题。本研究中的拍子同步任务是基于脚步周期而非步态周期进行设定的。

我们已对第 23 页第 20 行–第 23 页第 30 行、2.1.3 刺激部分以下几处调整：

(1). 明确定义脚步周期和步态周期：“标准生物运动中，左脚或右脚每次向前迈步都构成一个独立的脚步周期；而左右脚的交替运动构成更高阶的步态周期。一个步态周期需要完成一个完整步行循环，例如从左脚迈步开始，经右脚迈步，直至左脚再次准备迈步(Shen et al., 2023)”；

(2). 纠正：将“原始动画共有 133 帧，由于其中第 98 帧为左脚落地时刻，设定该帧为实验动画的第 1 帧，因此实验动画的一个刺激循环周期从原始动画的第 98 帧开始，至原始动画下一周期的第 97 帧结束(构成一个脚步周期)”改为“原始动画共有 133 帧，由于其中第 98 帧为左脚落地时刻，设定该帧为实验动画的第 1 帧，因此实验动画的一个刺激循环周期从原始动画的第 98 帧开始，至原始动画下一周期的第 97 帧结束(构成一个步态周期)”；

(3). 纠正：将“为确保从左脚落地到右脚落地的时长与从右脚落地到左脚落地的时长相同，删除了原始动画中的第 67 帧(该帧与第 66 帧和第 68 帧变化很小，删除不影响运动连贯性)。删除后，每个步态周期均包含 66 帧，时长 660 毫秒”改为“为确保从左脚落地到右脚落地的时长与从右脚落地到左脚落地的时长相同，删除了原始动画中的第 67 帧(该帧与第 66 帧和第 68 帧变化很小，删除不影响运动连贯性)。删除后，每个脚步周期均包含 66 帧，时长 660 毫秒”。

(4). 说明拍子同步任务的设定跟随脚步周期的依据：“将脚步周期作为跟随生物运动刺激的拍子间隔，这样设定的拍子速率 660 毫秒/拍接近人类最偏好的拍子速率(约 600 毫秒/拍)(Repp, 2005; Gan et al., 2015)”。

参考文献

Shen, L., Lu, X., Yuan, X., Hu, R., Wang, Y., & Jiang, Y. (2023). Cortical encoding of rhythmic kinematic structures in biological motion. *NeuroImage*, 268, 119893.

Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin &*

Review, 12(6), 969–992.

Gan, L., Huang, Y., Zhou, L., Qian, C., & Wu, X. (2015). Synchronization to a bouncing ball with a realistic motion trajectory. *Scientific reports*, 5(1), 11974.

**意见 6:** 文中剔除极端被试的标准是否有参考依据?

**回应:** 感谢审稿专家的提醒。

原文 2.1.5 分析中涉及了多个剔除极端被试的标准, 其相应依据如下:

**(1)注意力监测任务标准**

通过红色圆点变色监测任务评估被试的注意投放。若被试在任一刺激条件下的正确率低于 75%, 表明其未能充分注意视觉运动刺激的全局, 剔除该被试全部数据。参考依据: Slotboom 等人(2017)通过视觉搜索任务评估被试在视觉注意任务中的表现, 要求被试判断刺激形状的方向, 剔除了在任务中准确率低于 75%的被试数据, 以避免低表现数据对研究结果的影响。

参考文献:

Slotboom, J., Hoppenbrouwers, S. S., Bouman, Y. H., In't Hout, W., Sergiou, C., Van der Stigchel, S., & Theeuwes, J. (2017). Visual attention in violent offenders: susceptibility to distraction. *Psychiatry research*, 251, 281-286.

**(2)拍子同步速率控制标准**

本研究中听觉引导序列的目标拍子间隔为 660 ms。若被试在任一刺激条件下的平均敲击间隔(ITI)显著偏离目标值(ITI 均值 < 600 ms 或 ITI 均值 > 700 ms), 则表明该被试未能有效执行实验任务, 故剔除其全部数据。此标准的设定基于以下考虑: Patel 等人(2005)的研究显示, 当视觉闪烁条件下的刺激间隔与拍子间隔同为 800 ms 时, 被试 ITI 均值的个体差异范围为 775~825 ms, 即偏离目标值约±3.1%; 当刺激间隔为 400ms, 拍子间隔为 800ms 时, 被试 ITI 均值的个体差异范围为 750-850ms, 约为目标值的±6.2%。考虑到本研究任务的特殊性——被试需要在听觉引导后自主选择生物运动中的某种状态作为拍子点进行同步, 这一任务设计相比跟随离散的视觉闪烁刺激同步可能具有更高的认知负荷, 因而本研究将可接受的 ITI 范围设定为 600~700 ms(偏离 660 ms 目标值约±9.1%)。该标准在确保被试有效执行同步任务的同时, 充分考虑了任务复杂性所带来的个体差异。

参考文献:

Patel, A. D., Iversen, J. R., Chen, Y., & Repp, B. H. (2005). The influence of metricality and modality on synchronization with a beat. *Experimental Brain Research*, 163(2), 226–238.

**(3)拍子同步稳定性(ITI 标准差)极端值标准**

ITI 标准差反映敲击间隔的稳定性, 极端高值通常表明被试未能找到稳定的拍子点、注意力分散或任务理解错误、以及运动协调能力的极端情况。以全体被试拍子同步稳定性(ITI 标准差)的平均值+3 个标准差为界限、剔除超出此范围的极端数据。

现将相应段落修改为:

“剔除数据的标准有以下三条: (1)计算每种视觉运动刺激条件下被试在红色圆点变色监测任务上的正确率, 该任务的正确率过低提示被试可能没有将注意投放到视觉运动刺激的全局。如果被试有一个刺激条件在该任务上的正确率低于 75%, 则剔除该被试的全部实验数据(Slotboom, et al., 2017); (2)听觉节奏引导的拍子间隔为 660ms, 若被试在一个刺激条件下未能按听觉节奏引导的拍子速率打节拍(ITI 均值 < 600ms 或 ITI 均值 > 700ms), 则剔除该被试的全部实验数据。此标准基于 Patel 等人(2005)的研究中对视觉闪烁条件下 ITI 均值的报告: 在 800ms 刺激间隔-800ms 拍子间隔条件下, 被试 ITI 均值的个体差异范围在 775-825 ms, 约为目标值的±3.1%; 在 400ms 刺激间隔-800ms 拍子间隔下, 除一个极端值外, 被试 ITI 均

值的个体差异范围在 750~850ms, 约为目标值的 $\pm 6.2\%$ 。考虑到本研究任务要求被试在听觉引导后自主选择生物运动中的某种状态作为拍子点进行同步, 具有更高的认知负荷, 因此将可接受的 ITI 范围设定为 600-700ms(偏离 660ms 目标值约 $\pm 9.1\%$ ); (3) ITI 标准差反映敲击间隔的稳定性, 极端高值通常表明被试未能找到稳定的拍子点、注意力分散或任务理解错误、以及运动协调能力的极端情况。以全体被试拍子同步稳定性(ITI 标准差)的平均值+3 个标准差为界限, 剔除超出此范围的极端数据。按照上述标准, 实验 1 全部被试符合结果分析要求, 最终 30 人(女性 24 名)的结果纳入数据分析”。

见修改稿第 26 页第 23 行-第 27 页第 7 行。

除此之外, 在三个实验的数据分析部分, 更清晰地写出被试数据删除情况:

实验 1: “按照上述标准, 实验 1 全部被试符合结果分析要求, 最终 30 人(女性 24 名)的结果纳入数据分析”。见修改稿第 27 页第 6 行-第 27 页第 7 行。

实验 2: “一名被试满足数据剔除要求标准(2): 在倒置-打乱 BM 和匀速-打乱 BM 两个条件下 ITI 均值皆超过上限 700ms。两名被试满足数据剔除要求标准(3): 拍子同步稳定性指标 ITI 的标准差超过均值三个标准差。将三者数据剔除, 最终有效被试 27 人(女性 23 名)纳入数据分析。”。见修改稿第 29 页第 7 行-第 29 页第 9 行。

实验 3: “分析方法和数据剔除标准均与实验 1 相同。有两名被试满足数据剔除要求标准 3): 拍子同步稳定性指标 ITI 的标准差超过均值三个标准差。将二者数据剔除, 最终有效被试 33 人(女性 27 名)纳入数据分析”。见修改稿第 31 页第 7 行-第 31 页第 9 行。

意见 7: “进一步对比发现, 许多探究局部运动信息对生物运动感知作用的研究是在保持整体构型信息的前提下进行的,”没有引用具体的对比文献。事实上有很多发现局部生物运动加工特异性的文献用的是打乱生物运动。

回应: 非常感谢审稿专家的反馈, 此处确实存在问题, 我们将删除这句并重新表述。这就要对实验 2 未发现局部运动效应的结果进行讨论。现在已更新为下段表述:

“上述结果看似与既往研究形成对比。例如, Troje 和 Westhoff (2006)发现观察者能从打乱的生物运动中判断运动方向; Hirai 等人(2003)的 ERP 研究显示大脑对打乱条件下的局部生物运动仍有特异性反应。然而, 这些研究与本研究存在关键差异: 任务性质不同——前者多采用知觉判断任务(如方向辨别), 而本研究采用感觉-运动同步任务, 后者需要持续的时间预测和运动执行; 加工要求不同——知觉任务可能仅需要检测局部运动特征的存在, 而拍子同步需要精确提取和利用时间信息来指导动作输出。这提示, 在缺乏整体构型提供的先验模板时, 局部运动的生物性特征可能不足以支持稳定的感觉-运动协调”。见修改稿第 32 页第 28 行-第 33 页第 5 行。

参考文献:

Troje, N. F., & Westhoff, C. (2006). The inversion effect in biological motion perception: Evidence for a “life detector”? *Current biology*, 16(8), 821–824.

Hirai, M., Fukushima, H., & Hiraki, K. (2003). An event-related potentials study of biological motion perception in humans. *Neuroscience letters*, 344(1), 41–44.

.....

审稿人 2 意见:

审稿专家二的意见是在原文中用批注形式给出的, 现逐一系列出(圈定是指专家在原文中选定的文字, 批注是指专家针对圈定文字给出的具体批注意见):

意见 1: 圈定题目: “整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的作用”; 批注: 全文的语言

表述、中文句法结构、上下文表述及逻辑关系需要仔细修改。

**回应：**非常感谢您提出的宝贵意见。我们已对全文进行多方面的修改，所有修改在正文中都用蓝色字体标识。具体修改包括但不限于：重新组织了引言部分的文献综述逻辑，完善了方法部分的表述准确性、加强了讨论部分的论证深度、更正上一版中笔误。希望修改后的文章能够达到您的要求标准。

**意见 2：**圈定摘要“... 在保持整体构型信息时，较之保持局部运动信息的生物性，破坏它会降低生物运动拍子同步稳定性，...”批注：这句话表述不清楚？

**回应：**非常感谢审稿专家的反馈，此处确实未表述清楚。修改为“构型完整时，破坏局部运动变速生物性显著降低同步稳定性”。见修改稿第 18 页第 7 行-第 18 页第 8 行。

**意见 3：**圈定摘要“上述实验结果可以用贝叶斯理论解释：生物运动在保持人形的整体构型时能够激活大脑中的既存模板(提供先验信息)，局部运动信息的生物性提供的似然信息与基于既存模板的预测相匹配，此时个体感觉运动计时加工效率较高，表现为生物运动拍子同步稳定性较高；而当局部运动信息的生物性被破坏时，上述过程无法进行。当人形的整体构型被破坏时，没有既存模板被激活，大脑可能对局部运动似然信息的生物性不敏感，因而无论局部运动信息的生物性是否被破坏，感觉运动同步加工表现无差异。”批注：语言表述不清晰，请仔细修改中文表述方式。

**回应：**非常感谢审稿专家的反馈，此处确实表述不清楚，修改为：结果支持“整体先验—局部似然匹配”的贝叶斯机制：人形构型激活生物运动模板作为强先验，当局部运动保有生物性时，似然与先验匹配，预测误差小，感觉-运动计时负荷减轻，同步最稳定；整体构型破坏时强先验无法建立，大脑对局部运动生物性不敏感，因而无论局部生物性是否保持，同步表现趋同。研究表明整体构型主导先验生成，局部生物性仅在先验存在时调节感觉运动计时，为生物运动感知的层级加工机制提供新证据。见修改稿第 18 页第 8 行-第 18 页第 13 行。

**意见 4：**圈定前言，批注：进一步梳理清楚前言问题提出的逻辑思路，提出研究问题的创新性和研究的理论及实践意义？

**回应：**感谢审稿专家的宝贵建议。我们已对前言部分进行了全面修订，具体改进如下。我们重新梳理了前言的逻辑结构，添加了小标题，按照：“生物运动拍子同步及其进化意义→生物运动拍子同步研究的现状→整体构型与局部运动在生物运动感知中的作用→整体构型与局部运动在生物运动拍子同步中的潜在作用→研究问题与设计”的逻辑线索进行组织。对“1.3 整体构型与局部运动在生物运动感知中的作用”部分进行了大篇幅的修改，对文献重新组织，增添了包括神经影像学在内的研究发现，为本研究的假设提出提供更加坚实的文献基础。见修改稿第 20 页第 5 行-第 21 页第 1 行。

对“1.4 整体构型与局部运动在生物运动拍子同步中的潜在作用”部分，深化了理论假设基础，明确提出生物运动拍子同步过程可能遵循贝叶斯感知框架下的“整体先验—局部似然匹配”机制。见修改稿第 21 页第 2 行-第 21 页第 28 行。

在“1.5 研究问题与设计”部分，补充研究的创新性：创新性地运用“整体先验—局部似然匹配”的贝叶斯框架构建生物运动拍子同步的感觉运动计时理论机制，系统阐明了整体构型与局部运动在此过程中的交互作用。补充理论和实践意义：为理解大脑如何整合多层次生物运动信息指导时间预测和运动协调提供了重要的理论基础；可能为机器人和虚拟现实系统设计提供重要指导，为开发更自然、高效的人机交互界面提供科学依据。见修改稿第 21 页第 29 行-第 22 页第 5 行。

**意见 5:** 圈定实验 1、2.1.1 样本量规划, 批注: 三个实验的样本量计算放在实验 1 逻辑上有些不合适, 建议分别放在不同的实验中。

**回应:** 感谢审稿专家的建议。原本将样本量计算集中放置到实验一是因为三个实验采用了相同的统计功效分析方法和参数设置。为了提高可读性, 我们首先完善了实验 1 样本量计算的呈现, 使其更清晰; 其次, 在各实验的被试部分分别说明了具体的样本量安排, 并指引读者参考实验 1 中的详细计算过程, 这样既保持了逻辑清晰性, 又避免了不必要的重复。

实验 1 的样本量计算现保留在实验 1 的方法部分(见修改稿第 22 页第 24 行-第 23 页第 8 行); 实验 2 的样本量说明已移至实验 2 的方法部分(见修改稿第 28 页第 19 行-第 28 页第 21 行); 实验 3 的样本量说明已移至实验 3 的方法部分(见修改稿第 30 页第 18 行-第 30 页第 20 行)。

**意见 6:** 圈定实验 1、2.1.2 被试, 批注: 补充实验伦理审查和知情同意?

**回应:** 非常感谢审稿专家的提醒。本研究严格遵循科研伦理标准, 已通过山东师范大学心理学院研究伦理委员会批准(批准号: [SDNU2023052]), 所有被试在参与前均需签署知情同意书, 详细了解实验内容、潜在风险及其权利, 可随时无条件退出。已在三个实验的相应位置作出补充。见修改稿第 23 页第 12 行-第 23 页第 13 行、第 28 页第 25 行-第 28 页第 26 行、第 30 页第 24 行-第 30 页第 25 行。

**意见 7:** 圈定实验 1、2.1.3 刺激, “利用纯音(频率 1000Hz, 采样率为 44100, 时长为 0.05s)构造等时间间隔的听觉引导序列, 拍子间隔为 660ms”, 批注: 采样率是怎么计算出来的, 单位是什么, 具体是什么含义? 听觉引导序列的目的和意义是什么?

**回应:** 非常感谢审稿专家的提问。采样率 44100Hz 是音频领域的标准采样率(CD 音质标准), 单位为 Hz(赫兹), 表示每秒对声音信号采样 44100 次。这不是计算得出的, 而是我们选用的音频生成参数。原文中漏写采样率的单位, 可能引起误解, 我们已将采样率单位补充。见修改稿第 24 页第 18 行。

现在回答审稿专家的第二个问题: 听觉引导序列的目的和意义是什么? 有以下两个目的: 1. 本实验要求被试跟随生物运动(光点人行走)进行拍子同步任务。由于人类行走包含两个不同的周期性成分——脚步周期和步态周期, 被试可能会自发选择不同的同步策略, 这会造成实验结果的混淆。我们在每个试次前呈现听觉引导序列(660ms 间隔), 明确指示被试应按照脚步周期进行同步, 确保所有被试采用相同的同步策略。2. 更重要的是, 对于包含多个动点的视觉运动刺激而言, 不能强行将某一状态设置为拍子发生时刻, 这是因为不同被试对何时为“拍子点”可能有着不同的感知。例如, 有些被试可能倾向将左脚落地时的状态感知为拍子点, 有些被试可能倾向于将其他关节运动至拐点时的状态感知为拍子点。因此听觉引导序列还有第二个作用——允许个体化的拍子点选择: 被试先通过听觉引导序列确定拍子速度, 在随后出现的视觉运动刺激序列中保持该速度, 但可自主选择何种运动状态对应拍子点的发生。见修改稿第 24 页第 20 行-第 24 页第 23 行。

**意见 8:** 圈定实验 1、2.1.4 程序, “完成练习后进入该组块的正式实验, 正式实验部分包含 16 个试次, 除了每个试次序列包含 24 个拍子间隔外, 其他设置均与练习 2 保持一致” 批注: 给出因变量的指标?

**回应:** 感谢审稿专家的提醒。本实验的因变量指标为被试拍子同步敲击间隔(inter-tap interval, ITI)的标准差, 该指标反映了被试同步表现的稳定性。具体而言, 拍子同步敲击间隔是指被试相邻两次敲击键盘的时间间隔。我们采用以下步骤计算因变量: (1)剔除每个试次中前 5 次敲击, 以排除同步初始阶段的不稳定性影响(Repp, 2005); (2)计算每个试次内剩余敲击间

隔的标准差; (3)对正式实验 16 个试次的标准差取平均值, 作为最终的因变量指标。ITI 标准差是拍子同步研究中的经典指标, 其值越小表明被试的同步稳定性越高, 即被试能够更一致地维持目标节奏(Repp, 2005; Repp & Su, 2013)。上述内容在 2.1.5 分析部分给出, 见修改稿第 26 页第 16 行-第 26 页第 22 行。

参考文献:

Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic bulletin & review*, 12, 969–992.

Repp, B. H., & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006–2012). *Psychonomic bulletin & review*, 20(3), 403–452.

**意见 9:** 圈定实验 1、2.2 结果, “事后检验显示”, 批注: 给出具体的矫正方法?

**回应:** 感谢审稿专家的提醒。本实验的方差分析中, 采用 Bonferroni 的事后检验。将文中内容改为“使用 Bonferroni 的事后检验显示”。见修改稿第 27 页第 10 行。

**意见 10:** 圈定实验 1、图 3 “标准生物运动刺激(标准 BM)、打乱的生物运动刺激(打乱 BM)和打乱倒置的生物运动刺激(打乱-倒置 BM)的生物运动拍子同步稳定性指标注: 误差线代表标准误,  $*p < 0.05$ ,  $**p < 0.01$ ”, 批注: 为什么用标准差做指标? 下面结果分析同此。

**回应:** 感谢审稿专家的提问。关于为什么使用标准差作为拍子同步稳定性指标, 我们在审稿专家 2 第 8 个意见回复中已有详细说明。为便于审稿人查阅, 我们在此重申选择 ITI 标准差作为指标的理由: 在感觉运动同步研究领域, ITI 标准差是衡量同步稳定性的标准指标。标准差反映了被试敲击间隔的变异程度, 其值越小表明被试维持目标节奏的一致性越高, 即同步表现越稳定(Repp, 2005; Repp & Su, 2013)。已在实验 1 图 3 的图注中添加说明: “纵轴为拍子同步敲击间隔(ITI)的标准差, 该值越小表示同步稳定性越高”。

**意见 11:** 圈定实验 2、3.1.1 被试, 批注: 补充实验伦理审查和知情同意?

**回应:** 感谢审稿专家的提醒。三个实验均已补充实验伦理审查和知情同意。见修改稿第 23 页第 12 行-第 23 页第 13 行、第 28 页第 25 行-第 28 页第 26 行、第 30 页第 24 行-第 30 页第 25 行。

**意见 12:** 圈定实验 2、3.1.4 分析 “与实验 1 的分析方法相同。实验 2 剔除存在未能按听觉节奏引导的拍子速率打节拍的被试 1 人和极端数据的被试 2 人, 最终有效被试 27 人(女性 23 名)纳入数据分析。” 批注具体提出数据的依据?

**回应:** 感谢审稿专家的细致审阅。关于数据剔除的具体依据, 我们做如下说明:

本研究采用了三个剔除标准: 1. 注意力监测标准: 通过红色圆点变色监测任务评估被试的注意投放。若被试在任一刺激条件下的正确率低于 75%, 表明其未能充分注意视觉运动刺激的全局, 剔除该被试全部数据; 2. 同步速率标准: 本研究听觉引导的目标间隔为 660ms, 若被试在任一条件下的平均敲击间隔(ITI)偏离目标值过大(ITI 均值  $< 600\text{ms}$  或 ITI 均值  $> 700\text{ms}$ ), 表明其未能遵循实验指导, 剔除该被试全部数据, 实验 2 中 1 名被试因此被剔除; 3. 极端值标准: 以全体被试拍子同步稳定性(ITI 标准差)的平均值+3 个标准差为界限, 剔除超出此范围的极端数据。实验 2 中 2 名被试因此被剔除。

上述剔除标准已在实验 1 方法部分(第 26 页第 23 行-第 27 页第 6 行)详细说明。为避免重复, 我们已将实验 2 中的相关描述修改为: “分析方法和数据剔除标准均与实验 1 相同。一名被试满足数据剔除要求标准(2): 在倒置-打乱 BM 和匀速-打乱 BM 两个条件下 ITI 均值皆超过上限 700ms。两名被试满足数据剔除要求标准(3): 拍子同步稳定性指标 ITI 的标准差

超过均值三个标准差。将三者数据剔除，最终有效被试 27 人(女性 23 名)纳入数据分析。”(见修改稿第 29 页第 7 行-第 29 页第 10 行)。

**意见 13:** 圈定实验 2、图 4 “打乱的生物运动刺激(打乱 BM)、打乱倒置的生物运动刺激(倒置-打乱 BM)和打乱匀速的生物运动刺激(匀速-打乱 BM)的生物运动拍子同步稳定性指标”，批注：标准差指标同上。

**回应:** 感谢审稿专家的提问。ITI 标准差是拍子同步研究中的经典指标，其值越小表明被试的同步稳定性越高，即被试能够更一致地维持目标节奏(Repp, 2005; Repp & Su, 2013)。已在实验 2 图 4 的图注中添加说明：“纵轴为拍子同步敲击间隔(ITI)的标准差，该值越小表示同步稳定性越高”。见修改稿第 29 页第 17 行。

**意见 14:** 圈定实验 3、4.1.2 刺激，“采用 Boxtel 等人(2013)生物运动工具箱中提供的生物运动数据制作标准生物运动刺激、打乱的生物运动刺激、标准匀速的生物运动刺激、打乱匀速的生物运动刺激四种刺激。打乱的生物运动刺激、打乱匀速的生物运动刺激的编制同实验 2，在标准生物运动刺激基础上，保留各个光点的运动轨迹而移除光点运动的加速度，各光点的速率为各自原始运动的平均速率，得到未打乱匀速的生物运动刺激。听觉引导序列也与实验 1 相同。”批注：给出具体的实验设计和实验处理分配。

**回应:** 感谢评审的意见。此处是描述四种刺激的制作方法。根据评审建议，我们在实验 3 的介绍部分给出详细的实验设计和实验处理分配：

“实验 2 的结果表明，单独操纵局部运动信息(保持或破坏其生物性)并未显著影响生物运动拍子同步表现。这一发现提示，局部运动信息可能需要在特定条件下才能发挥作用，其中整体构型信息的完整性可能是关键因素。基于此，实验 3 旨在系统考察整体构型信息与局部运动信息对生物运动拍子同步的交互作用。

实验 3 采用 2×2 因子设计，通过操纵整体构型(保持 vs. 破坏)和局部运动(保持 vs. 破坏)两个因素，形成四种实验条件：(1)标准生物运动刺激(保持整体构型、保持局部运动)；(2)打乱生物运动刺激(破坏整体构型、保持局部运动)；(3)匀速生物运动刺激(保持整体构型、破坏局部运动)；(4)打乱匀速生物运动刺激(破坏整体构型、破坏局部运动)。通过比较这四种条件下的拍子同步稳定性，可以明确两类信息的交互效应”。

见修改稿第 30 页第 8 行-第 30 页第 16 行。

**意见 15:** 圈定 4.3 讨论，“实验 3 发现生物运动的整体构型和局部运动对生物运动拍子同步稳定性有显著交互作用，即在保持整体构型信息时，破坏局部运动信息的生物性会使生物运动拍子同步稳定性有显著降低；在破坏整体构型信息时，破坏局部运动信息的生物性对生物运动拍子同步稳定性无显著作用。这一结果与假设相符。”批注：这能说明什么问题，进一步解释说明？

**回应:** 感谢评审的意见。已在 4.3 讨论部分补充以下内容：

“该交互作用表明，局部运动信息对拍子同步的作用依赖于整体构型的完整性。当整体人形构型存在时，局部运动的生物性特征成为影响同步表现的关键因素；而整体构型破坏后，局部运动生物性的作用消失。这种层级性加工模式支持了贝叶斯预测编码框架下的‘整体先验—局部似然匹配’机制：整体构型激活生物运动先验，局部运动信息作为似然证据与先验匹配时促进同步；而先验缺失时，局部信息失去匹配模板，其生物性特征不再影响同步表现”。见修改稿第 32 页第 7 行-第 32 页第 12 行。

**意见 16:** 圈定总讨论，批注：仔细修改语言表述，上下文的讨论的逻辑思路，补充三个研究

的关系和综合性讨论。

**回应：**感谢评审的意见。感谢审稿人建议。我们已仔细修改总讨论的语言表述，梳理了上下文逻辑思路，补充三个研究间的关系分析，并进行综合性讨论，使该部分更严谨清晰。请见总讨论蓝色标识部分。见修改稿第 32 页第 14 行-第 33 页第 9 行。

**意见 17：**圈定总讨论，第 6 段“上述跨研究间的一致性可以用贝叶斯理论解释”，批注：这是一种推测解释之一，补充其他相关的理论和观点的解释。

**回应：**感谢评审的意见。已在总讨论中补充神经通路理论的解释：

“神经通路理论从神经机制层面为本研究发现提供了另一种解释框架。传统双通路模型区分了腹侧“what”通路(初级视觉皮层(V1)→第四视觉区(V4)→下颞叶皮层(IT)，处理物体形状和识别)和背侧“where/how”通路(V1)→中颞区(MT)→顶叶，处理空间位置和运动)(Ungerleider & Mishkin, 1982)。近期研究进一步提出了第三条视觉通路，从 V1 经 MT/第五视觉区(V5)投射到上颞沟(STS)，专门处理生物运动等动态社会信息(Pitcher & Ungerleider, 2021)。特别值得注意的是，Gilaie-Dotan 等人(2015)发现腹侧通路严重损伤的患者仍能正常感知生物运动，表明生物运动加工具有独特的神经基础。基于这些神经解剖学证据，本研究的发现可能反映了不同视觉通路在处理生物运动时的功能分工和交互模式。整体构型可能通过快速的全局加工(可能涉及 STS 等高级视觉区域)建立生物运动的时空表征框架，为后续的精加工提供了组织原则和预期结构。局部运动信息(如关节的加速度变化)虽然在 MT/V5 等运动敏感区域被持续处理，但其对行为的影响依赖于是否能够整合进由整体构型建立的表征框架中。当整体构型被打乱后，虽然局部运动特征仍被视觉系统编码，但缺乏组织框架使得这些信息无法有效转化为指导感觉-运动同步的时间预测信号。

以上解释与近期关于视觉通路交互性的理解一致——各通路并非独立并行处理，而是存在大量的相互连接和功能整合。整体构型信息可能通过自上而下的反馈连接调节局部运动加工的效率或权重，这种调节作用在构型破坏后消失。重要的是，这种神经架构层面的解释与基于贝叶斯框架的“整体先验—局部似然匹配”解释实际上描述了同一现象的不同层面——前者关注实现机制，后者关注计算原理”。

见修改稿第 33 页第 23 行-第 34 页第 10 行。

**意见 18：**圈定总讨论，第 7 段“本研究仍存在一定的局限性。未来研究可以尝试基于贝叶斯模型进行更精细的量化建模，以进一步验证该理论框架的预测效果。此外，可以采用脑成像技术进一步探讨整体构型和局部运动对生物运动拍子同步作用的神经机制” 批注：建议补充针对本研究的局限性讨论，以及有待未来解决的问题？补充研究的理论与实践意义。

**回应：**感谢评审的意见。已在总讨论中补充对本研究的局限性讨论、以及有待未来解决的问题：

“本研究虽提出了‘整体先验-局部似然匹配’的贝叶斯框架解释实验结果，但存在两个关键局限。首先，缺乏量化贝叶斯模型的直接验证。在本研究中无法量化整体构型提供的先验强度、局部运动的似然函数，以及两者的动态整合过程。未来研究应构建形式化的贝叶斯分层模型，通过操纵刺激不确定性估计先验和似然的相对精度，并使用模型比较定量评估不同理论假设。其次，缺乏神经影像学证据。虽然推测 STS 可能负责整体构型识别并生成先验，MT/V5 编码局部运动信息，但这种功能分工及其交互机制仍需验证。未来可结合功能磁共振成像的空间分辨率和脑磁图或脑电图技术的时间分辨率，使用模型化分析将贝叶斯模型的内部变量作为神经活动的预测因子，并通过经颅磁刺激等因果干预技术验证关键脑区的功能作用，深化对生物运动感觉-运动协调机制的理解”。见修改稿第 34 页第 11 行-第 34 页第 19 行。

对于研究的理论和实践意义已根据审稿专家二、问题 4 的建议，补充在前言 1.5 部分：“这为理解大脑如何整合多层次生物运动信息指导时间预测和运动协调提供了重要的理论基础。在应用方面，研究发现可能为机器人和虚拟现实系统设计提供重要指导，为开发更自然、高效的人机交互界面提供科学依据”。见修改稿第 22 页第 2 行—第 22 页第 5 行。

---

## 第二轮

**审稿人 1 意见：**作者已经很好地回复了我上一轮的意见。

**审稿人 2 意见：**

作者根据修改意见逐一对论文进行了详细的修改，整体文章质量有很大的提升，这轮修改后在研究的目的、研究问题创新性还不是很清晰到位，建议补充；理论和具体实践意义方面阐述过于简单，建议补充。

**意见 1：**在研究的目的、研究问题创新性还不是很清晰到位，建议补充。

**回应：**非常感谢审稿专家的反馈，此处确实未表述清晰。我们已在引言“1.5 研究问题与设计”中补充论述研究的目的和创新性，所有修改在正文中都用蓝色字体标识。

**研究目的：**“本研究旨在探究生物运动拍子同步中整体构型与局部运动的独立作用及交互机制，揭示生物运动感觉-运动计时的层级加工原理。具体通过三个递进实验，系统分离整体构型和局部运动对拍子同步的作用，探索两者如何共同影响感觉-运动同步表现”，见修改稿第 23 页第 29 行-第 24 页第 2 行。

**研究问题创新性：**“研究的创新性如下：第一，首次探究基于生物运动的感觉运动计时的影响因素，系统考察整体构型和局部运动在生物运动拍子同步中的独立作用及其交互作用，填补了生物运动拍子同步领域的研究空白。第二，理论上首次将生物运动拍子同步纳入贝叶斯感知框架，提出“整体先验-局部似然匹配”的层级加工机制，为生物运动加工理论提供新的解释视角”，见修改稿第 24 页第 12 行-第 24 页第 15 行。

**意见 2：**理论和具体实践意义方面阐述过于简单，建议补充。

**回应：**非常感谢审稿专家的反馈，此处确实有所疏漏。我们已在讨论部分中补充论述研究的理论和具体实践意义，并已将增加相应参考文献添加到文献列表中，所有修改在正文中都用蓝色字体标识。

在讨论部分补充“综上，本研究具有以下理论意义：第一，验证了层级加工机制的领域普适性。通过感觉运动同步实验验证了完整人形构型作为强先验表征，能够自上而下地组织局部运动信息，显著降低感觉运动计时的不确定性，进而提升感觉运动同步的稳定性。这表明信息加工的整体优先性原则不仅适用于传统的知觉判断任务(Johansson, 1973; Navon, 1977; Blake & Shiffrar 2007) 还可以拓展至感觉-运动时序协调领域，深化了对生物运动层级加工机制普适性的理解。第二，深化了贝叶斯预测编码机制的行为证据。研究发现“局部运动生物性的作用需依赖整体先验的激活”，该现象契合贝叶斯框架下先验-似然加权机制，表明高质量感觉信息需在强先验约束下才能优化时序预测。该模式与重力方向先验信息促进时间预测(Gan et al., 2015; Zhou et al., 2015)的发现相呼应，提示在感觉运动同步中存在普适性的先验调节原则。

此外，本研究的实践意义主要体现在两个方面：其一，创新神经康复系统设计。基于“完

整人形构型可作为强先验来稳定感觉-运动同步”的发现，可以开发基于虚拟现实(VR)的神经康复系统。该系统通过设计符合生物运动特性的虚拟人形动画向导，使患者在沉浸式环境中进行步态协同训练。结合可视化动作匹配与实时反馈技术，采用“整体优先、局部细化”的递进式训练策略，引导患者逐步优化步态节奏，有效降低步态变异性和同步误差。其二，丰富自闭症谱系障碍(ASD)的诊断技术。由于 ASD 患者对生物运动的整体加工存在特异性缺损(Klin & Jones, 2008; Kaiser et al., 2010)，通过对比“标准生物运动刺激”与“打乱的生物运动刺激”条件下的感觉运动同步任务表现，捕捉整体加工缺损，可提升早期 ASD 筛查的敏感性与特异性。”见修改稿第 36 页第 20 行-第 37 页第 7 行。

新增参考文献：

Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of human motion. *Annu. Rev. Psychol.*, 58(1), 47–73.

Kaiser, M. D., Hudac, C. M., Shultz, S., Lee, S. M., Cheung, C., Berken, A. M., ... & Pelphrey, K. A. (2010). Neural signatures of autism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(49), 21223–21228.

Klin, A., & Jones, W. (2008). Altered face scanning and impaired recognition of biological motion in a 15-month-old infant with autism. *Developmental Science*, 11(1), 40–46.

---

### 第三轮

审稿人 2 意见：

作者回复的提出的问题，对文章做了相应补充修改。建议根据编辑部要求修改校对即可。

编委意见：

该研究探究了生物运动的整体构型信息与局部运动信息对生物运动拍子同步的影响，为了解有关生物运动加工机制提供了新的视角。研究设计严谨，结论可靠，参考外审专家意见进行修改后，本论文已经达到《心理学报》发表文章的相关要求，参考审稿人的建议，同意录用。

主编意见：

经两位专家审阅，均同意刊发。审稿程序合规，稿件质量符合发表要求，建议接受刊用。