

整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的作用*

路晓漫[†] 杜依珂[†] 叶文龙 王海飞 孟鲁 周梁

(山东师范大学心理学部, 山东省脑科学与心理健康重点实验室, 济南 250014)

摘要 本研究通过改进的拍子同步范式, 探究整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的影响。实验 1 显示, 整体构型保持时的同步稳定性显著高于构型破坏时; 构型破坏后, 局部运动方向生物性的破坏或保持对同步稳定性无显著影响。实验 2 在构型破坏前提下, 对比三种局部运动状态发现: 无论破坏方向生物性还是变速生物性, 同步稳定性均与保留局部运动生物性条件无显著差异。实验 3 揭示交互作用: 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; 构型破坏时, 局部运动生物性保持或破坏间的同步表现无差异。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。

关键词 生物运动, 拍子同步, 整体构型, 局部运动

分类号 B842

1 引言

生物运动(biological motion, BM)是指人或动物在空间上的整体性移动行为(蒋毅, 王莉, 2011), 研究生物运动通常使用光点人形序列作为刺激, 这些序列展示了人体重要关节的动态变化(Johansson, 1973)。研究表明, 人们能够轻松地检测出光点人形序列, 并从中提取和解释大量关于运动主体的信息, 例如动作朝向、性别、身份、情感和意图等。有研究表明, 人类在出生仅两天时就已经具备了加工生物运动的能力, 可以识别出光点人形序列并表现出注视偏好(Bertenthal, 1993)。随着年龄的增长, 人类对于光点运动序列的辨别能力不断提高, 5 岁时已经接近成人水平(Pavlova et al., 2001),

并且在老年时期仍保持良好水平(Norman et al., 2004)。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。

1.1 生物运动拍子同步及其进化意义

生物运动通常蕴含节奏。这种节奏有时是由单一动作的重复形成(例如, 行走时脚步的交替), 有时是由动作组合的重复构成(例如, 华尔兹中转体、旋转、转身这一组合的重复)。跟随生物运动节奏中的拍子进行同步动作是人类的一项基本能力, 被称为生物运动拍子同步, 它是一种基于生物运动的感觉运动同步加工。感觉运动同步指人类将自身动作与感官输入中的时间规律(通常表现为序列中的拍子)保持协调同步的过程, 以感觉系统与运动系

收稿日期: 2025-03-15

* 国家自然科学基金(32100853, 31871100), 山东省自然科学基金(ZR2021QC134), 山东省高等学校“青创团队计划”团队(2023KJ196)资助。

[†] 路晓漫和杜依珂为共同第一作者。

通信作者: 周梁, E-mail: Zhouliang_group@163.com

统的实时耦合为基础的计时过程是感觉运动同步的底层机制。跟随生物运动刺激进行拍子同步对于人类生存有着重要的现实意义。例如,在舞蹈中统一的动作可以增加表演的感染力,在军队行进中齐整的步伐可以提升士气、威慑敌人。此外, Jordania (2011) 提出的视听恐吓显示模型 (Audio-Visual Intimidating Display) 指出,原始人类有组织、有节奏的群体同步动作可以向捕食者展示该群体的团结和强大;对于个体而言,参与这种动作上的同步能够减轻恐惧和疼痛,提示了生物运动拍子同步具有重要的进化意义。

1.2 生物运动拍子同步研究的现状

目前针对生物运动拍子同步的研究相对匮乏。Su (2016a) 选取包含两个韵律周期 (metrical periodicities) 的舞蹈动作作为实验刺激,用以研究生物运动节奏同步。在这种舞蹈动作中,躯干每一拍弹跳一次,而四肢每两拍移动一次,形成了两个韵律周期。结果发现,被试可以根据偏好自由选择一种韵律周期作为拍子,并与之同步动作,这与听觉通道内的相关发现一致。Su (2016b) 的研究发现,在生物运动节奏同步中存在着与听觉节奏同步相似的“细分效应”:即当由腿部动作表征的拍子被躯干动作的加入分割成更小的部分时,被试拍子同步的准确性和稳定性都有提升。以上对于人类舞蹈动作同步的研究是基于复杂节奏,即一段节奏中包含多个韵律水平。目前少有研究涉及对跟随由单一重复的生物运动(例如,行走、开合跳)作拍子同步的探讨。这类生物运动拍子同步是感觉运动同步的重要形式。

借助脑电技术, Shen 等人(2023)记录了被试在观看人类行走运动时大脑对步态周期(行走时左右脚交替形成的周期)以及脚步周期(行走的每一步构成的周期)的响应。步态周期提供了关于左右两侧肢体运动相位关系的信息,而这是脚步周期所不具备的。他们发现,在步态周期对应的频率(1 Hz)上,大脑皮层中的同步性神经振荡活动表现出了倒置效应:正立生物运动刺激诱发神经夹带活动的强度显著大于倒置刺激。与之对照的是,在脚步周期对应的频率(2 Hz)上,正立生物运动刺激与倒置刺激均诱发较强的神经夹带活动,两者无显著差异。以上结果提示大脑对步态周期的节律性神经活动编码具有生物运动加工的特异性。虽然 Shen 等人(2023)的研究并未要求被试跟随生物运动拍子进行外显的同步动作,但这种大脑神经振荡的高兴奋性

阶段与外在周期性事件的出现保持一致的现象被称为内隐性同步,它可能是拍子同步的基础(Repp & Su, 2013)。这提示 Shen (2023)在神经振荡层面发现的大脑对行走运动加工的生物运动特异性效应可能在行为层面(即拍子同步)中也存在。

1.3 整体构型与局部运动在生物运动感知中的作用

对于生物运动来讲,整体构型与局部运动是来自两种层次的重要信息。局部运动是指各光点的运动所提供的轨迹和速度信息;整体构型指的是光点人形序列中各光点提供的位置信息整合起来形成的身体形状信息(蒋毅,王莉,2011),与局部运动所提供的速度、轨迹等低阶物理层面的信息相比,它是更高阶的信息。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(Sun et al., 2022; Wang et al., 2010)。

整体构型(global configuration)在生物运动感知中发挥着独立且关键的作用。Bertenthal 和 Pinto (1994)发现,当用多个具有相同运动轨迹但空间位置随机打乱的干扰光点掩蔽关节光点时,观察者在存在/不存在判断任务中仍能检测正立的光点行走者,但倒立显示的检测率降至随机水平,证明了人体形态是作为整体涌现属性被直接感知的,而非通过先检测局部特征再组合形成。倒置效应进一步支持了整体加工观点。类似于面孔知觉(Yin, 1969),生物运动刺激垂直旋转 180 度后,观察者在目标检测、动作识别、方向辨别等任务中的成绩显著下降(Bertenthal & Pinto, 1994; Dittrich, 1993),这被归因于整体结构信息的破坏而非局部运动信息的损伤。技术分离研究提供了更直接的证据。Beintema 和 Lappe (2002)运用有限时程技术去除局部运动信息但保留静止构型信息,发现观察者仍能识别行走方向,且成绩与光点数量(提供构型信息)而非持续时间(提供局部运动信息)相关,支持了基于形状信息累积的模板匹配模型——该模型认为视觉系统内部储存着人体各种静态姿态的模板库,通过将输入的光点位置与这些静态模板进行匹配来识别生物运动(Lange et al., 2006)。神经影像学研究进一步揭示了这一机制的神经基础:Thompson 等人(2005)发现,无论刺激是否被部分遮挡(破坏了局部特征和关节连接的连续可见性),颞上沟(STS)对完整行走者的激活始终强于四肢和躯干被打散的行走者,表明 STS 采用整体性的身体构型模型而非局部特征追踪来处理生物运动。以上研究结果都表明,整体

构型在生物运动感知过程中发挥重要作用。

局部运动信息在生物运动感知中同样发挥着独立且重要的作用。Mather 等人(1992)操纵光点序列的帧间时间间隔和间隔帧数,发现随着时间间隔和间隔帧数的增加,观察者知觉生物运动的能力受到损害。由于增加帧间间隔破坏了局部运动信息即各个点的运动轨迹的加工,而整体形状信息的加工则不受影响,表明局部运动信息对生物运动加工具有重要作用。基于局部运动的倒置效应挑战了倒置效应的单一解释。Troje 和 Westhoff (2006)发现了与整体结构信息无关的倒置效应:采用打乱的生物运动序列(破坏整体结构信息而保留局部运动信息),观察者仍可分辨人的行走方向,但倒置时则不能分辨。进一步研究表明,仅把代表脚的两个光点倒置就足以产生此效应,该效应依赖于脚部运动的垂直重力加速度,表明局部运动本身包含了特定的生物信息。以上研究结果表明,生物运动知觉并非单一现象,而是一种具有不同加工机制(基于整体结构和基于局部运动)的多水平现象,局部运动信息能够独立于整体构型发挥作用,为生物运动感知提供重要贡献。

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

对生物运动拍子同步而言,整体构型与局部运动的作用还未被探究。上述提及的 Shen (2023)研究中,对比了正立和倒置的生物运动在步态周期上所诱发大脑神经振荡强度的差异。但由于倒置这种操纵同时破坏了刺激的整体构型信息和局部运动信息,因而不能分离整体构型信息和局部运动信息对生物运动拍子同步的独特作用。从贝叶斯感知框架来看,生物运动拍子同步过程可能遵循“整体先验—局部似然匹配”机制。一方面,基于视觉加工的“整体优先性原则”(Kimchi, 1994; Navon, 1977; Navon, 2003),当生物运动进入观察者的视野中,整体构型信息可能会优先于局部运动信息获得加工。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),因此预期整体构型信息会提升基于拍子的感觉运动计时,表现为生物运动拍子同步的提升。

另一方面,局部运动的生物性特征决定了其作

为似然信息的质量。以往研究发现,与匀速运动或正弦运动相比,跟随仿重力弹跳小球进行拍子同步时表现最佳(Gan et al., 2015; Zhou et al., 2020)。对生物运动的局部运动而言,由于受到来自重力、生物力学的共同制约(Cavagna et al., 1977; Troje & Westhoff, 2006),其局部运动模式具有生物特性。当局部运动保持生物性时,其提供的感觉似然信息与生物运动先验高度匹配,预测误差最小化,生物运动拍子同步表现最佳。当局部运动模式被破坏后,先验—似然匹配度降低,预测误差增大,基于拍子的感觉运动计时也会受到影响,生物运动拍子同步稳定性降低。

更重要的是,整体构型与局部运动可能基于“整体先验—局部似然匹配”机制对生物运动拍子同步产生交互作用。当整体构型完整时,强先验被成功激活,此时局部运动的生物性特征决定了似然信息与先验的匹配程度:局部运动保持生物性时,与既存模板的预测相符,先验—似然高度匹配,感觉运动计时负荷小,同步表现最佳;局部运动被破坏时匹配度下降,同步稳定性降低。然而,当整体构型信息被破坏时,有关人体运动的既存模板无法被激活,生物运动的强先验无法建立或激活强度较弱,此时大脑主要依赖自下而上的感觉输入进行计时,对局部运动生物性变化的敏感性降低,局部运动的生物性是否被破坏对拍子同步的影响差异可能较小。

1.5 研究问题与设计

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3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:实验1探究整体构型对生物运动拍子同步的作用(标准生物运动刺激 vs. 打乱的生物运动刺激),并通过倒置的方法破坏局部运动的方向生物性,探究局部运动对生物运动拍子同步的影响(打乱的生物运动刺激 vs. 打乱倒置的生物运动刺激)。实验2在破坏整体构型的前提下,探究通过不同方式破坏局部运动信息的生物性后,生物运动拍子同步表现的差异。具体对比打乱的生物运动(保持局部运动的生物性)、打乱倒置的生物运动(破坏局部运动的方向生物性)、打乱匀速的生物运动(破坏局部运动的变速生物性)三种刺激条件下的拍子同步稳定性差异。在实验1与实验2的基础上,实验3通过比

较标准生物运动刺激、打乱的生物运动、标准匀速的生物运动和打乱匀速的生物运动四种刺激条件下的生物运动拍子同步稳定性, 检验整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的作用是否存在交互。

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。

2 实验 1: 分别探究整体构型、局部运动对生物运动拍子同步的作用

实验 1 通过将光点空间置乱的方式破坏生物运动的整体构型信息, 通过倒置关节光点使运动矢量方向镜像翻转, 破坏局部运动信息在方向上的生物性。具体地, 通过对比标准生物运动和打乱的生物运动两种刺激条件下的拍子同步稳定性, 探究整体构型信息对生物运动拍子同步的作用; 通过对比打乱的生物运动和打乱倒置的生物运动两种刺激条件下的拍子同步稳定性, 可以在排除整体构型信息影响的前提下, 探究局部运动信息对生物运动拍子同步的作用。

2.1 方法

2.1.1 样本量规划

采用 G*Power 3.1 进行样本量估算。本研究旨在考察整体构型效应(标准生物运动 vs. 打乱生物运动)以及局部运动效应(打乱生物运动 vs. 打乱倒置生物运动)对生物运动拍子同步的影响。

整体构型效应的效应量估计: Troje 和 Westhoff (2006)在方向辨别任务中发现, 标准生物运动与打乱生物运动条件下的表现差异为 0.19, 对应 Cohen's $d = 1.14$; Sun 等人(2017)在运动检测任务中发现, 标准生物运动与打乱生物运动条件下的表现差异为 0.36, 对应 Cohen's $d = 0.8$ 。基于这两项研究的效应量, 在 0.05 显著水平(双尾)、统计检验力为 0.95 的条件下, 计算所需样本量分别为 13 人和 20 人。

局部运动效应的效应量估计: Troje 和 Westhoff (2006)研究中, 打乱生物运动与打乱倒置生物运动条件下的表现差异为 0.38, 对应 Cohen's $d = 1.59$ 。基于此效应量, 在 0.05 显著水平(双尾)、统计检验

力为 0.95 的条件下, 计算所需样本量为 8 人。

样本量确定: 综合考虑上述两类效应, 为确保研究具有充足的统计检验力以检测预期效应, 本研究各实验的样本量应不少于 20 人。基于这一估算, 实验 1 计划招募 30 名被试, 已满足统计检验力要求。

2.1.2 被试

实验 1 招募在校本科生 30 人(女性 24 名), 年龄为 19.13 ± 2.47 岁。所有被试均自愿参加实验, 身体健康, 听力以及视力(或矫正视力正常)正常, 均为右利手, 无精神疾病史, 实验后获得报酬。本研究已通过山东师范大学心理学院研究伦理委员会批准, 实验 1 所有被试在参与前均签署了知情同意书, 参与实验后均获得一定的报酬。

2.1.3 刺激

刺激通过 MATLAB 2016b 与 Psychophysics Toolbox Version 3 (PTB-3)编写和展示, 屏幕分辨率为 1920×1080 , 刷新率为 100 Hz。

本研究设计了三类等时间间隔的视觉运动刺激序列, 分别为标准生物运动、打乱的生物运动和打乱倒置的生物运动(见图 1)。刺激制作基于 Van Boxtel 和 Lu (2013)提供的生物运动数据(文件编号: Walker.txt, 后文称原始动画)。标准生物运动刺激包含 13 个点, 分布于头部 1 个, 肩部 2 个, 髋关节 2 个, 手肘 2 个, 手腕 2 个, 膝盖 2 个, 脚踝 2 个。标准生物运动刺激大小为 $4.76^\circ \times 2.86^\circ$ 。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)。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)。为确保从左脚踏地到右脚踏地的时长与从右脚踏地到左脚踏地的时长相同, 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 ms。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 ms/拍接近人类最偏好的拍子速率(约 600 ms/拍)(Repp, 2005)。

打乱的生物运动刺激是在标准生物运动刺激基础上, 随机打乱各光点的起始位置, 但保持其运动模式不变, 实现破坏整体构型信息但保留局部运

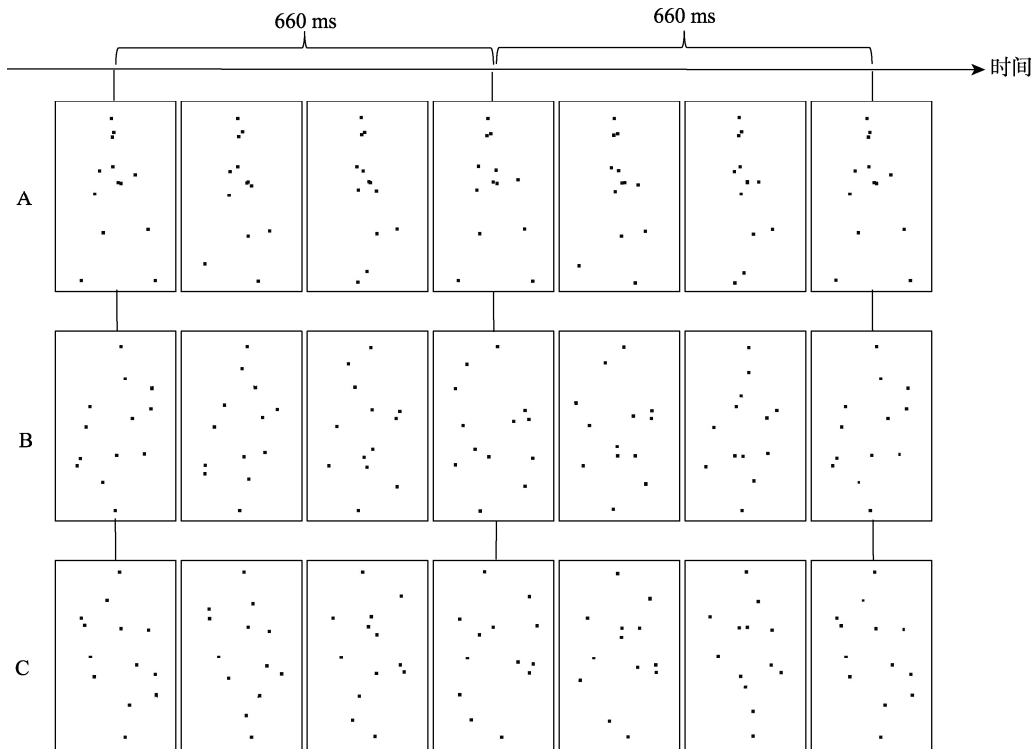


图 1 标准生物运动、打乱的生物运动、打乱倒置的生物运动三种条件刺激图

动信息。打乱倒置的生物运动刺激是将打乱的生物运动刺激沿水平线镜面对称得到，既破坏了整体构型信息，又通过改变局部运动的方向而破坏局部运动信息的生物性。打乱的生物运动刺激和打乱倒置的生物运动刺激的高度和宽度与标准生物运动刺激相同。实验动画的帧数的选取方式、周期界定标准和标准生物运动刺激一致，因此一个拍子间隔仍为 660 ms。

呈现视觉运动刺激时，屏幕中央始终呈现注视点(见图 2)，注视点为倒置的棕色实心等边三角形 0.38° ，距离刺激运动轨迹的最低处为 2.38° 。4 个红色圆点 (0.18°) 始终呈现在视觉运动刺激周围(即在视觉运动刺激虚拟矩形外框的 4 个顶点处)。确定 4 个红色圆点位置的虚拟矩形 ($3.35^\circ \times 5.72^\circ$) 以注视点为中心、4 个边平行于屏幕四边，虚拟矩形在实验中并不呈现。

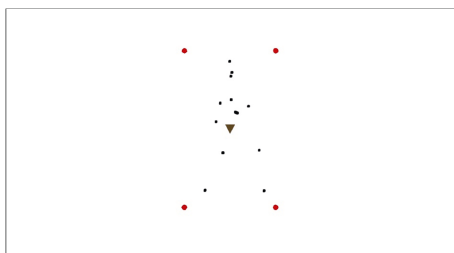


图 2 实验刺激布局示意图
注：彩图见电子版

实验中被试有两个任务。一是盯着注视点，跟随视觉运动刺激序列右手按 J 键进行拍子敲击。二是用余光注意视觉运动刺激周围的 4 个红色圆点，若有红色圆点变色则左手按 F 键反应(简称红色圆点变色监测任务)。发生一次变色时，虚拟矩形主对角线或副对角线上的两个圆点由红色闪变成黄色，持续 0.5 s，再变回红色。在正式实验随机选择的 50% 试次中，红色圆点会发生 1 至 4 次不等的变色。另外 50% 的试次中，红色圆点不会变色。设置红色圆点变色监测任务的目的是调控被试的注意范围，使视觉运动刺激整体落入其注意范围内，避免被试仅注意并跟随个别光点的运动进行拍子同步。

利用纯音(频率 1000 Hz，采样率为 44100 Hz，时长为 0.05 s)构造等时间间隔的听觉引导序列，拍子间隔为 660 ms。呈现纯音序列时，注视点中心位于屏幕中央处，不呈现红色圆点。在生物运动序列前，呈现听觉引导序列的作用有二：(1)由于人类行走包含脚步周期和步态周期两种周期性成分，听觉引导通过 660 ms 间隔明确指示被试按脚步周期同步，避免同步策略混淆；(2)允许被试在保持统一拍子速率的前提下，自主选择将何种运动状态(例如，左脚落地或其他关节运动至拐点)作为拍子点，兼顾了实验控制与个体知觉差异。

2.1.4 程序

被试坐在距离显示屏 60 cm 的位置上。标准生

物运动、打乱的生物运动以及打乱倒置的生物运动这三种刺激条件分别在三个组块内呈现,刺激条件的顺序效应平衡。每个组块中包含练习部分(练习 1 和练习 2)和正式实验。

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。为此,本研究采用改进后的拍子同步范式,在练习 1 中使用听觉引导序列先使被试确定拍子速度,在随后出现的视觉运动刺激序列中要求被试保持在听觉引导序列中感知到的拍子速度,并自主选择何种运动状态对应拍子的发生。具体地,在练习 1 的每个试次中,首先呈现听觉引导序列(包含 5 个拍子间隔)。随后呈现 2 s 黑色空屏。空屏结束后,呈现当前组块对应的视觉运动刺激序列(包含 14 个拍子间隔)。这一过程中,要求被试始终盯着注视点,跟随刺激序列进行拍子同步。在呈现视觉运动刺激时,除了进行拍子同步任务,还需完成外周红色圆点变色监测任务。练习 1 包含两个试次,待练习 1 结束后,若被试主观报告可以稳定地跟随视觉运动刺激序列作拍子同步,则进入练习 2,否则返回练习 1 继续练习。练习 2 包含两个试次,每个试次中不再包含听觉引导序列,其他设置与练习 1 一致。完成练习后进入该组块的正式实验。

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,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。

2.1.5 分析

将每种视觉运动刺激条件中红色圆点未变色的试次纳入重复测量方差分析,自变量为视觉运动刺激类型,因变量指标为被试拍子同步敲击间隔(inter-tap interval, ITI)的标准差(Repp, 2005), ITI 标准差越小,拍子同步稳定性越高。具体而言,ITI 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: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);计算每个试次内剩余敲击间隔的标准差;对正式实验部分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)。

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 660 ms,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 < 600 ms 或 ITI 均值 > 700 ms),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“800 ms 刺激间隔、800 ms 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 $\pm 3.1\%$;在“400 ms 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 750~850 ms,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 600~700 ms (偏离 660 ms 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。

2.2 结果

单因素重复测量方差分析结果表明,不同刺激类型下生物运动拍子同步稳定性存在显著差异, $F(2, 58) = 4.60, p = 0.014, \eta_p^2 = 0.14$ 。采用 Bonferroni 的事后检验显示:(1)标准生物运动刺激($M = 0.05, SD = 0.01$)条件下生物运动拍子同步稳定性既显著高于打乱的生物运动刺激条件($M = 0.05, SD = 0.01, p = 0.004$),也显著高于打乱倒置的生物运动刺激条件($M = 0.05, SD = 0.01, p = 0.033$);(2)打乱的生物运动刺激和打乱倒置的生物运动刺激两种条件下被试的生物运动拍子同步稳定性无显著差异, $p = 0.387$ (见图 3)。

2.3 讨论

实验 1 的结果显示,相对于打乱的和打乱倒置的生物运动刺激条件,标准生物运动刺激条件下生物运动拍子同步稳定性显著更高,这表明整体构型信息对生物运动刺激诱发的感觉运动同步有促进

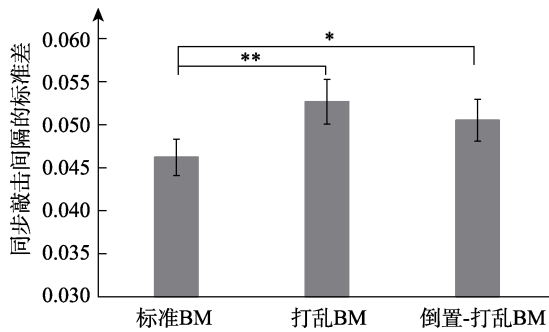


图3 标准生物运动刺激(标准 BM)、打乱的生物运动刺激(打乱 BM)和打乱倒置的生物运动刺激(倒置-打乱 BM)的生物运动拍子同步稳定性指标

注: 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。误差线代表标准误, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

作用。这一结果符合预期。然而, 打乱的与打乱倒置的两种生物运动刺激条件下的拍子同步稳定性无显著差异, 与预期不符。相比于打乱生物运动刺激, 打乱倒置的生物运动刺激仅改变了局部运动相关矢量(如, 加速度、速度、位移)的方向, 而并没有改变这些矢量的大小随时间变化的模式, 而矢量的大小随时间变化的模式可能是被保留的能够辅助拍子同步的生物性线索。因此在实验2拟采用消除光点加速度的方式来破坏局部运动信息的生物性。

3 实验2: 探究以不同方式破坏局部运动信息的生物性对生物运动拍子同步产生的影响

实验1揭示了整体构型信息对生物运动拍子同步的促进作用, 但由于倒置仅改变了局部运动相关矢量(如, 加速度、速度、位移)的方向, 而并没有改变这些矢量的大小随时间变化的模式(变速模式), 可能仍然较多地保留了局部运动信息的生物性。为弥补实验1的不足, 实验2设置打乱匀速的生物运动刺激: 在打乱生物运动刺激基础上, 保留各光点轨迹, 消除光点运动加速度, 使各光点的速率为各自原始运动的平均速率, 以上方式可以破坏局部运动信息在变速模式上的生物性。

具体地, 通过对比打乱生物运动、打乱倒置生物运动和打乱匀速生物运动三种刺激条件下的拍子同步稳定性, 探究不同方式破坏局部运动信息的生物性对生物运动拍子同步的影响。

3.1 方法

3.1.1 样本量规划

样本量计算基于与实验1相同的效应量估计, 样本量规划计算得样本量应不少于20人。基于这

一估算, 实验2计划招募30名被试, 已满足统计检验力要求。

3.1.2 被试

实验2招募在校本科生30人(女性23名), 年龄为 19.47 ± 1.25 岁。所有被试均自愿参加实验, 身体健康, 听力以及视力(或矫正视力正常)正常, 均为右利手, 无精神疾病史, 实验后获得报酬。本研究已通过山东师范大学心理学院研究伦理委员会批准, 实验2所有被试在参与前均签署了知情同意书, 参与实验后均获得一定的报酬。

3.1.3 刺激

采用Van Boxtel和Lu(2013)生物运动工具箱中提供的生物运动数据制作打乱生物运动、打乱倒置生物运动、打乱匀速生物运动三种刺激。打乱生物运动、打乱倒置生物运动两种刺激的编制同实验1。在打乱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, 得到打乱匀速生物运动刺激。听觉引导序列也与实验1相同。

3.1.4 程序

与实验1的程序相同。

3.1.5 分析

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3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。

3.2 结果

单因素重复测量方差分析结果表明, 不同刺激类型下生物运动拍子同步稳定性无显著差异, $F(2, 52) = 1.23, p = 0.297$ (图4)。

3.3 讨论

实验2发现, 打乱生物运动、打乱倒置生物运动和打乱匀速生物运动三种刺激条件下的生物运动拍子同步稳定性无显著差异, 这表明在整体构型信息被破坏时, 局部运动信息是否被破坏对生物运动拍子同步稳定性无显著影响。打乱生物运动刺激、打乱倒置生物运动刺激和打乱匀速生物运动刺激三者整体构型信息均被破坏。整体构型信息可能为观察者提供了辅助组织和处理局部运动信息的框架, 从而促进个体对于生物运动周期

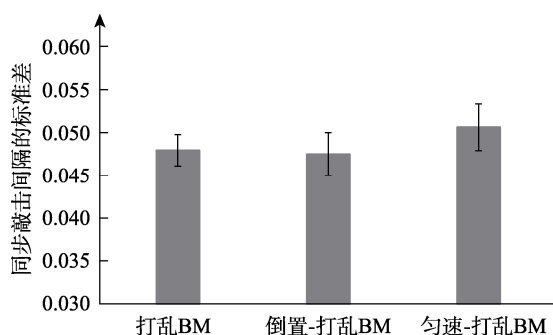


图 4 打乱的生物运动刺激(打乱 BM)、打乱倒置的生物运动刺激(倒置-打乱 BM)和打乱匀速的生物运动刺激(匀速-打乱 BM)的生物运动拍子同步稳定性指标
注:纵轴为拍子同步敲击间隔(ITI)的标准差,该值越小表示同步稳定性越高。误差线代表标准误。

性时空信息的预测与捕捉,进而提升生物运动拍子同步的稳定性;当整体构型信息被破坏时,生物运动无法为被试提供组织局部运动信息的加工框架,因此局部运动信息对生物运动拍子同步的影响可能仅在整体构型信息完好的前提下才会发生作用,这一假设将在实验 3 中进行检验。

4 实验 3: 探究整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的交互作用

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 4 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 4 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。

4.1 方法

4.1.1 样本量规划

样本量计算基于与实验 1 相同的效应量估计,样本量规划计算得样本量应不少于 20 人。基于这一估算,实验 3 计划招募 35 名被试,已满足统计检验力要求。

4.1.2 被试

实验 3 招募在校本科生 35 人(女性 28 名),年龄为 19.91 ± 1.53 岁。所有被试均自愿参加实验,身体健康,听力以及视力(或矫正视力正常)正常,均为右利手,无精神疾病史,实验后获得报酬。本研究已通过山东师范大学心理学院研究伦理委员会批准,实验 3 所有被试在参与前均签署了知情同意书,参与实验后均获得一定的报酬。

4.1.3 刺激

采用 Van Boxtel 和 Lu (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。标准生物运动刺激、打乱的生物运动刺激的编制同实验 1;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。

4.1.4 程序

与实验 1 的程序相同。

4.1.5 分析

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 3 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。

4.2 结果

如图 5 所示,两因素重复测量方差分析结果表明,整体构型的主效应显著, $F(1, 32) = 10.12, p = 0.003, \eta_p^2 = 0.24$,有整体构型时的生物运动拍子同步稳定性显著高于整体构型被破坏条件。局部运动的主效应不显著, $F(1, 32) = 0.41, p = 0.525$ 。两者的交互作用显著, $F(1, 32) = 4.32, p = 0.046, \eta_p^2 = 0.12$ 。进一步简单效应分析表明,整体构型存在时,局部有加速度($M = 0.05, SD = 0.02$)条件下的生物运动拍子同步稳定性显著高于局部匀速($M = 0.05, SD = 0.02$)条件, $F(1, 32) = 4.63, p = 0.039, \eta_p^2 = 0.13$;整体构型被破坏时,局部有加速度($M = 0.05, SD = 0.02$)与局部匀速($M = 0.05, SD = 0.02$)两种刺激条件下的生物运动拍子同步稳定性无显著差异, $F(1, 32) = 1.34, p = 0.256$ 。

4.3 讨论

实验 3 发现生物运动的整体构型和局部运动对

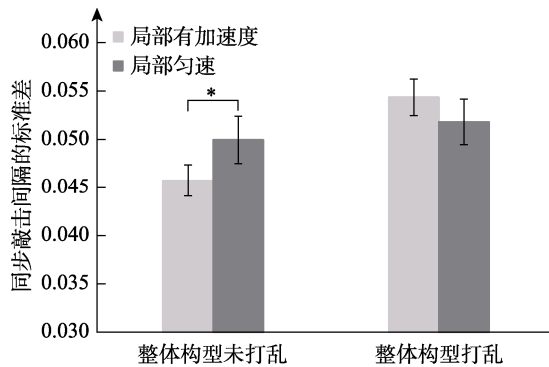


图5 标准生物运动刺激(整体构型未打乱且局部有加速度条件)、未打乱匀速的生物运动刺激(整体构型未打乱且局部匀速条件)、打乱的生物运动刺激(整体构型打乱且局部有加速度条件)以及打乱匀速的生物运动刺激(整体构型打乱且局部匀速条件)的生物运动拍子同步稳定性指标

注: 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。误差线代表标准误, $*p < 0.05$

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。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。

5 总讨论

本文采用改进后的拍子同步范式, 通过3个递进式实验考察了生物运动的整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的影响。

首先, 实验1发现保持整体构型显著提升了生物运动拍子同步稳定性, 这一研究结果与以往研究一致, 整体构型信息在对生物运动的探测、方向辨别和生物性评级等任务有着重要的促进作用(Bertenthal & Pinto, 1994; Beintema et al., 2006; Chang & Troje, 2008; Shiffrar et al., 1997)。整体构型可能为组织和加工局部运动信息提供先验模板。而这种模板强化了个体对事件的预测能力, 从而提高个体拍子捕捉的准确性。

其次, 实验1和实验2探究了局部运动信息的独立作用。实验1发现, 打乱倒置与打乱的生物运动在拍子同步稳定性上无显著差异。由于倒置操纵仅改变了局部运动矢量的方向, 但保留变速式。由于变速模式本身可能蕴含着丰富的生物性信息, 因而实验2采用了更严格的操纵——消除光点运动的加速度变化, 创建了打乱匀速的生物运动刺激, 彻底破坏了局部运动在时间维度上的生物性特征。结果显示, 三种条件(打乱、打乱倒置、打乱匀速)的同步稳定性均无显著差异。两个实验一致表明, 在整体构型缺失时, 局部运动信息无法独立影响拍子同步表现。

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。

最后, 实验3进一步检验生物运动的整体构型与局部运动对生物运动拍子同步的交互作用。结果发现交互作用显著: 即当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; 当破坏整体构型信息时, 是否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。

本研究发现的这种“整体依赖性”的局部信息加工模式符合“整体先验-局部似然匹配”的理论机制。具体而言, 完整的人形构型使大脑建立起强烈的生物运动先验预期。在此条件下, 保持生物性特征的局部运动(如自然的加速度变化)作为似然信息与先验预期高度吻合, 预测误差最小, 从而促进稳定的感觉运动同步; 反之, 破坏局部运动生物性(如匀速化)则违背了预期的生物运动规律, 产生较大预测误差, 进而损害同步表现。而当整体构型被破坏后, 大脑无法建立有效的生物运动先验, 失去了评估局部运动生物性的参照标准。在这种情况下, 大脑对不同局部运动特征的敏感性显著降低, 导致

各种局部运动条件下的同步表现趋于一致。

本研究发现与其他领域的类似现象形成呼应。Gan 等人(2015)发现,在重力作用方向上,向下加速的小球比匀速小球产生更稳定的拍子同步,但 Zhou 等人(2020)发现这种优势在逆重力方向消失。这种模式与本研究惊人相似:重力方向激活物理运动先验,如同人形构型激活生物运动先验;只有先验存在时,符合预期的局部特征才能促进同步。这种跨领域的一致性支持了感知-运动系统的一般性原则:先验知识调节感觉信息的加工权重。

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。

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。本研究范式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 TMS 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。

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(Blake & Shiffrar 2007; Johansson, 1973; Navon, 1977)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., 2020)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(Kaiser et al., 2010; Klin & Jones, 2008),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。

6 结论

生物运动的拍子同步稳定性受到整体构型和局部运动的共同调控。保持整体构型信息能促进生物运动的拍子同步稳定性。当保持整体构型信息时, 相比于保持局部运动信息的生物性, 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; 当破坏整体构型信息时, 是否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影响。

致谢: 感谢高安琦同学在文章修改上的协助; 感谢史欣同学在实验数据收集上的帮助。感谢审稿专家和编辑反馈的宝贵意见。

参 考 文 献

- 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.
- Beintema, J. A., & Lappe, M. (2002). Perception of biological motion without local image motion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(8), 5661–5663.
- Beintema, J. A., Georg, K., & Lappe, M. (2006). Perception of biological motion from limited-lifetime stimuli. *Perception & Psychophysics*, 68(4), 613–624.
- Bertenthal, B. I. (1993). Infants' perception of biomechanical motions: Intrinsic image and knowledge-based constraints. In C. Granrud (Ed.), *Visual Perception and Cognition in Infancy* (pp. 175–214). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Bertenthal, B. I., & Pinto, J. (1994). Global processing of biological motions. *Psychological Science*, 5(4), 221–225.
- Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of human motion. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 47–73.
- Cavagna, G. A., Heglund, N. C., & Taylor, C. R. (1977). Mechanical work in terrestrial locomotion: Two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 233(5), R243–R261.
- Chang, D. H., & Troje, N. F. (2008). Perception of animacy and direction from local biological motion signals. *Journal of Vision*, 8(5), 3, 1–10.
- Dittrich, W. H. (1993). Action categories and the perception of biological motion. *Perception*, 22(1), 15–22.
- 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.
- Gilaie-Dotan, S., Saygin, A. P., Lorenzi, L. J., Rees, G., & Behrmann, M. (2015). Ventral aspect of the visual form pathway is not critical for the perception of biological motion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(4), E361–E370.
- Hirai, M., Fukushima, H., & Hiraki, K. (2003). An event-related potentials study of biological motion perception in humans. *Neuroscience Letters*, 344(1), 41–44.
- Jiang, Y., & Wang, L. (2011). Biological motion perception: The roles of global configuration and local motion. *Advances in Psychological Science*, 19(3), 301–311.
- [蒋毅, 王莉. (2011). 生物运动加工特异性: 整体结构和局部运动的作用. *心理科学进展*, 19(3), 301–311.]
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14(2), 201–211.
- Jordania, J. (2011). Sexual selection or natural selection? New look on the evolution of human morphology, behavior and art. *Kadmos*, 3, 400–416.
- 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.
- Keller, G. B., & Mrcic-Flogel, T. D. (2018). Predictive processing: A canonical cortical computation. *Neuron*, 100(2), 424–435.
- Kimchi, R. (1994). The role of wholistic/configural properties versus global properties in visual form perception. *Perception*, 23(5), 489–504.
- 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.
- Lange, J., & Lappe, M. (2006). A model of biological motion perception from configural form cues. *Journal of Neuroscience*, 26(11), 2894–2906.
- Lange, J., Georg, K., & Lappe, M. (2006). Visual perception of biological motion by form: A template-matching analysis. *Journal of Vision*, 6(8), 836–849.
- Mather, G., Radford, K., & West, S. (1992). Low-level visual processing of biological motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 249(1325), 149–155.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9(3), 353–383.
- Navon, D. (2003). What does a compound letter tell the psychologist's mind? *Acta Psychologica*, 114(3), 273–309.
- Norman, J. F., Payton, S. M., Long, J. R., & Hawkes, L. M. (2004). Aging and the perception of biological motion. *Psychology and Aging*, 19(1), 219–225.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Chen, Y., & Repp, B. H. (2005). The influence of metricity and modality on synchronization with a beat. *Experimental Brain Research*, 163(2), 226–238.
- Pavlova, M., Krägeloh-Mann, I., Sokolov, A., & Birbaumer, N. (2001). Recognition of point-light biological motion displays by young children. *Perception*, 30(8), 925–933.
- Pitcher, D., & Ungerleider, L. G. (2021). Evidence for a third visual pathway specialized for social perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(2), 100–110.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 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.
- 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.
- Shiffrar, M., Lichtey, L., & Chatterjee, S. H. (1997). The perception of biological motion across apertures. *Perception*

- & *Psychophysics*, 59(1), 51–59.
- Slotboom, J., Hoppenbrouwers, S. S., Bouman, Y. H. A., 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.
- Su, Y. H. (2016a). Visual tuning and metrical perception of realistic point-light dance movements. *Scientific Reports*, 6, 22774.
- Su, Y. H. (2016b). Sensorimotor synchronization with different metrical levels of point-light dance movements. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 186.
- Sun, Y., Stein, T., Liu, W., Ding, X., & Nie, Q. Y. (2017). Biphasic attentional orienting triggered by invisible social signals. *Cognition*, 168, 129–139.
- Sun, Y., Wang, X., Huang, Y., Ji, H., & Ding, X. (2022). Biological motion gains preferential access to awareness during continuous flash suppression: Local biological motion matters. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(2), 309–320.
- Thompson, J. C., Clarke, M., Stewart, T., & Puce, A. (2005). Configural processing of biological motion in human superior temporal sulcus. *Journal of Neuroscience*, 25(39), 9059–9066.
- Troje, N. F., & Westhoff, C. (2006). The inversion effect in biological motion perception: Evidence for a “life detector”? *Current Biology*, 16(8), 821–824.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 549–586). MIT Press.
- Van Boxtel, J. J., & Lu, H. (2013). A biological motion toolbox for reading, displaying, and manipulating motion capture data in research settings. *Journal of Vision*, 13(12), 7, 1–16.
- Wang, L., Zhang, K., He, S., & Jiang, Y. (2010). Searching for life motion signals: Visual search asymmetry in local but not global biological-motion processing. *Psychological Science*, 21(8), 1083–1089.
- Yin, R. K. (1969). Looking at upside-down faces. *Journal of Experimental Psychology*, 81(1), 141–145.
- Zhou, L., Shangguan, M., Xing, L., Yu, H., Wang, H., Hove, M. J., & Li, S. (2020). Separating the effects of stimulus-gravity compatibility and stimulus-response compatibility on visuomotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 46(4), 405–415.

Roles of global configuration and local motion in beat synchronization with biological motion

LU Xiaoman, DU Yike, YE Wenlong, WANG Haifei, MENG Lu, ZHOU Liang

(School of Psychology, Shandong Provincial Key Laboratory of Brain Science and Mental Health, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract

Humans have an inherent ability to perceive biological motion (BM) in their surroundings and align with its rhythm, even when it is depicted through a simplified arrangement of light points. Point-light BM, although simplified, encompasses global configuration and local motion trajectories, which are crucial for perception. Prior research has advanced our understanding of BM processing, but few studies have thoroughly investigated the respective roles of global configuration and local motion in beat synchronization with BM. This study aimed to investigate the mechanisms underlying the interaction between global configuration and local motion information during beat synchronization with BM.

This study comprised three experiments involving 30, 27, and 33 Chinese participants in experiments 1, 2, and 3, respectively. All the experiments employed a beat synchronization paradigm, in which participants were required to concurrently engage in beat synchronization and change detection tasks. The materials utilized in experiment 1 included standard, scrambled, and inverted scrambled BM. Experiment 2 comprised scrambled, inverted scrambled, and scrambled uniform BM. Experiment 3 encompassed standard, unscrambled uniform, scrambled, and scrambled uniform BM. The stability of beat synchronization was the primary dependent variable across all experiments.

Experiment 1 demonstrated that beat synchronization stability under the standard BM condition was considerably higher than that observed in the scrambled and inverted scrambled BM conditions. This finding highlights the critical role of global configuration information in the synchronization process. In Experiment 2, under the condition of disrupted global configuration, a comparison of the three local motion states showed that disrupting either the biological nature of motion direction or the biological nature of speed variation resulted in no significant difference in synchronization stability compared to preserving local biological motion. The lack of global configuration information may restrict the influence of local motion on the stabilization of synchronization.

Experiment 3 revealed an interaction: when the global configuration was intact, disrupting the biological nature of local speed variation significantly reduced synchronization stability; however, when the global configuration was disrupted, synchronization performance showed no difference between preserving and disrupting the biological nature of local motion. This finding suggests that global configuration is essential for the functioning of local motion information.

This study demonstrated that beat synchronization with BM is influenced by global configuration and local motion, and global configuration exerts a dominant influence. The findings can be analyzed using Bayesian theory: when the global configuration of BM is preserved, human-like information activates preexisting brain templates, providing prior knowledge, and local motion presents likelihood information that corresponds with these predictions. This condition ensures efficient sensorimotor timing, which is evidenced by increased stability in beat synchronization. Conversely, when the global configuration is disrupted, strong priors cannot be established, and the brain becomes insensitive to the biological nature of local motion; consequently, local motion has no significant effect on synchronization performance. The findings align with Bayesian theory and offer a novel perspective on the mechanisms underlying BM timing process.

Keywords biological motion, beat synchronization, global configuration, local motion