

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：生物运动方向估计的计算机制：基于高效编码的贝叶斯推理模型

作者：孙梦颖，冉平，孙琪

第一轮

审稿人 1 意见：

本文首次系统性地研究了生物运动方向估计的内部噪音与先验效应，并结合计算建模加以验证，具有较强的理论创新性。两个实验设计合理，数据量充足，建模分析较为严谨，整体质量较高。但在题目表述、前言结构、方法说明及部分理论解释上仍有改进空间。有以下问题供作者参考。

意见 1：文章题目不精简，不符合中文题目的习惯，建议修改文章题目

回应：的确，且读起来也很绕口。现在修改为：生物运动方向估计的计算机制：基于高效编码的贝叶斯推理模型。新题目既交代了研究目的“生物运动方向估计的计算机制”，又阐明了研究方法“基于高效编码的贝叶斯推理模型”。

意见 2：实验先做了内部噪音再操纵了先验，但是前言先介绍了先验和实验，为何不对应？

回应：感谢审稿专家指出的这一重要问题。您观察得非常细致，原文前言部分的叙述顺序（先介绍先验，后介绍内部噪音）与实验设计的逻辑顺序（实验 1 研究内部噪音，实验 2 研究先验）确实存在不一致，这影响了论文逻辑的连贯性。我们完全接受您的意见，并对前言部分进行了调整，使其与实验设计的递进逻辑保持一致。具体而言，将内部噪音的定义和相关研究提到先验定义和相关研究的前面，即原第 2 和第 3 段的顺序重新调整，同时也修改了相应的表达，让语言更加流畅。

意见 3：前言介绍时内部噪音，是不是也说一下贝叶斯和 likelihood 的关系？

回应：感谢审稿专家提出的重要建议。我们完全赞同您的看法，在引言部分阐明内部噪音与贝叶斯推理框架中“似然函数”的理论关联，对于构建统一的计算视角至关重要。但我们并未在介绍“内部噪音”行为影响的部分直接插入理论细节，而是选择在过渡到“计算机制”的段落开头，自然地建立这一联系。修改后的文本首先明确点出：“在贝叶斯推理框架中，内部噪音的强度决定了感官证据的可靠性，即塑造了似然函数 $p(m | \theta)$ 的精度；而先验知识则表现为先验概率分布 $p(\theta)$ ”。随后，再顺理成章地介绍各类贝叶斯观察者模型。详细修改，请见修改稿件引言的第四和第五段。

意见 4：前言的感觉分段太多，有些可以合并。例如，以往有关生物。。和在关注粗糙辨别偏差的同时。。此外，前言写作中，逻辑可以更连贯一些，并介绍一下高效编码约束的贝叶斯模型的优势。

回应：感谢审稿专家的建议。我们对相应段落进行了凝练“在生物运动方向知觉领域，现有研究已揭示了不同任务层面的系统性偏差。一方面，在粗糙辨别任务中（如判断行走方向是朝向或远离自己），被试普遍表现出“朝向偏差”（facing-forward bias），即更倾向于判断为朝向自己运动（Chen & Mitsudo, 2023; Schouten et al., 2010; Schouten et al., 2013; Vanrie et al.,

2004; Weech & Troje, 2018; Weech et al., 2014)。另一方面, 在要求对方向进行精细的连续估计时 (如匹配或复现具体方向), 研究则发现了参考排斥偏差, 即估计值会系统性地偏离感知最为精确的参照方向 (如 0°) (Sweeny et al., 2012; Sun et al., 2023; Sun et al., 2025a)。然而, 这些研究主要集中于对现象本身的描述和确认, 对于驱动这些偏差的关键计算因素, 如, 内部噪音如何调节偏差幅度, 以及长期经验形成的先验如何与即时刺激信息整合, 仍缺乏系统的实证检验与统一的理论解释。这一理论空白限制了我们从计算层面深入理解视觉系统如何处理生物运动这类复杂的社交性视觉信息。

为此, 本研究旨在通过两个行为实验结合计算建模, 系统探究先验与内部噪音对生物运动方向精细估计的影响及其计算机制。具体而言, ……”。

同时在最后一段补充了模型的优势“……对两个实验的数据, 我们选择采用扩展的高效编码约束贝叶斯观察者模型来解释数据。该框架它不仅能够定量描述知觉偏差 (描述性), 更能为偏差的产生提供从神经编码到行为决策的完整计算解释 (机制性)。具体而言, 它将“高效编码”的神经优化原则与“贝叶斯推理”的认知计算原则相统一, 为理解先验如何内在在地塑造感官表征 (似然), 并最终导致系统性行为偏差, 提供了一个连贯且可检验的数学模型。本研究旨在验证该模型对复杂生物运动感知的解释力, 从而深化对生物运动知觉机制的理解, 并为视觉计算理论提供新的证据。”

意见 5: 被试数量那里建议补充功效分析。

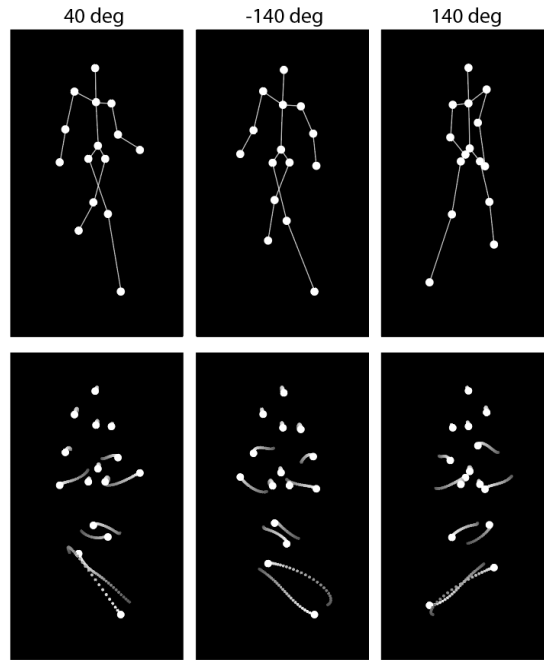
回应: 已补充相关分析。

意见 6: 方法部分。文中写道: “不同 PLW 方向出现的试次数由函数 $(1.97 - \text{abs}(\sin(2\theta)))/\text{sum}(\dots)$ 确定, 形成四峰分布模式”。但实际刺激方向仅限于 $[-63^\circ, 63^\circ]$, 而“反应界面”才呈现四峰分布。建议澄清该表述。

回应: 非常感谢审稿专家如此细致地审阅并指出这一关键表述不清之处。您说得完全正确, 原文的描述确实容易引起混淆。我们实验中呈现的刺激方向范围是 $[-63^\circ, 63^\circ]$, 而“四峰分布”是指我们假设的、存在于完整 360° 方向空间中的长时先验分布 (其峰值位于 $0^\circ, \pm 90^\circ, 180^\circ$)。为了在有限的实验方向范围内体现这一先验, 并避免直接呈现 180° (远离) 方向, 我们依据四峰分布的概率密度函数, 对 $[-63^\circ, 63^\circ]$ 区间内的方向进行了加权采样。这样, 刺激分布在该区间内继承了四峰先验的统计特征, 即在 0° 方向附近出现频率最高, 在 $\pm 63^\circ$ 附近 (接近 $\pm 90^\circ$) 出现频率较低。我们已对原文进行了修订, 以澄清这一点。

意见 7: 生物运动应该是三维的, 但是投递到电脑上是二维的, 如何保证被试在看到 -45° , 不会判断为 135°

回应: 非常仔细的思考!!! 根据前人二则一的研究 (facing towards vs. facing backwards) 的结果发现, 观察者会将一部分向前运动的刺激误认为向后运动, 这是视觉系统内在的一种固有偏差。但在 15 个点构成的 PLW, 且正立的情况下, 该偏差极少发生。这主要取决于一些 PLW 局部信息, 比如肘部和膝关节的凹凸性; 另外脚部的加速度的方向也是重要的线索。您可以对比下面的图像:



综合此类种种信息，因此观察者可以有效避免将前进（e.g., 45 deg），误认为后退（e.g., -135 或 135 deg）的偏差。

意见 8：本文只做了高效编码约束的贝叶斯模型，有没有必要对不同的模型进行比较。

回应：非常感谢审稿专家提出这一重要的方法论问题。我们完全同意，在计算建模研究中，对多个备选模型进行比较是评估所选模型合理性和优越性的标准做法。针对您的意见，我们希望能从以下两个层面进行说明。

第一层面：研究核心目标与模型选择的理由：本研究的主要理论目标，是检验“高效编码约束的贝叶斯推理”这一特定计算框架能否解释生物运动方向感知这一复杂社会知觉任务。这一框架（特别是其近期包含“知觉-反应映射”的扩展版本）在解释简单视觉特征（如朝向、对比度）及自身运动感知方面已展现出强大的统一解释力。因此，本文的核心贡献在于将这一前沿框架首次系统应用于生物运动方向精细估计领域，并验证其适用性。选择该模型进行检验，是基于明确的理论驱动，而非在一个宽泛的模型空间中进行无差别的探索。

第二层面：本文实际进行的模型比较工作：尽管研究聚焦于一个核心框架，但我们在文中并非只拟合了一个单一模型。实际上，我们已经进行了两个重要维度的模型比较：（1）先验结构的比较：在高效编码贝叶斯框架内，我们系统比较了基于不同假设的长时先验（均匀、双峰、三峰、修正四峰、标准四峰），结果发现四峰长时先验模型具有最佳的解释力（图 5，附录表 1）。这本身就是在核心框架下对不同“子模型”的比较。（2）整合机制的检验：我们明确比较了视觉系统是仅使用长时先验、仅使用短时先验，还是整合两者（公式 4.1-4.3）。实验 2 的结果有力地支持了“仅使用长时先验”的模型。

此外，为方便读者更方便理顺我们的模型构建逻辑，我们对 2.3 部分的第一段进行了修改：“实验 1 行为结果中观察到的整体估计偏差模式与扩展的高效编码约束贝叶斯推理模型的预测一致。为全面检验该模型并确定其关键成分，我们进行了两个层面的模型比较。首先，我们构建了以 *ecBMm* 为基础、但采用不同先验假设的模型（图 2b）；其次，我们比较了该框架下不同的先验利用策略（单独长时先验、单独短时先验、加权整合）。此外，先前研究均未明确构建 PLW 方向的长时先验分布，因此我们构建了多种长时先验分布（图 2c 和图 5），以探究 PLW 方向的长时先验分布的精确表征。”

最后，再衷心感谢您宝贵的指导建议，也希望上述回应能够解答您的问题！祝您新年快乐，工作顺利，万事顺意！

.....

审稿人 2 意见：

本研究通过行为研究结合数学建模的方法，探讨了不同先验信息在进行生物运动辨别时的作用。具体而言，研究通过两项行为实验，基于不同的实验刺激分布验证了长期稳定先验信息在知觉生物运动时的关键作用。研究采用了较为复杂的量化分析手段，基于以往研究构建了一个多阶段的量化模型，对整个生物运动识别过程进行了细致且完整的分析，关键结果也比较明确，具有较高的理论价值。另外，此类通过特异化的分析性量化模型来探讨认知加工过程的研究近年来在国际上逐渐形成一种趋势，而国内期刊上类似研究的发表较少。故从研究结果和推广相关方法的角度出发，本人均支持本文的发表。不过在发表此文之前，本文还有一些需要修改或澄清的内容，罗列如下：

意见 1：数学模型的描述需要进一步加强。目前对于数学模型**的描述过于铺成**。对于相关知识背景不强的读者而言，相关内容可能过于晦涩。希望可以以讲述的方式对模型进行进一步的解释，对公式的内在含义进行展开描述。

回应：非常感谢审稿编辑的建议。我们对模型的构建逻辑，和一些公式做了进一步的解释说明（详情请见文章 2.3 部分）。但的确如您所述，这个研究基于的公式较为复杂，需要相关背景知识，因此我们又插入了两篇中文参考文献，一篇已正式发表，另一篇已录用，这将更有助于读者深入理解整个计算逻辑。

孙琪. (2025). 视知觉中的贝叶斯观察者模型及其未来展望. 心理科学, 48(4): 836-846.

孙琪. (accepted). 视知觉中的高效编码约束的贝叶斯推理模型及其应用展望. 心理科学.

除修正 2.3 模型计算方法外，我们还在讨论部分，额外插入了一段，进一步总结研究中模型的发现。“本研究结果表明，*PLW* 方向估计遵循一个受高效编码约束的贝叶斯推理框架。简单来说，视觉系统会依据日常经验（先验）来优化其神经编码策略，这使得它对常见方向（如迎面走来）的感官测量本身就更精确。当内部噪音增大（如观看时间缩短）时，这种编码策略与贝叶斯整合的共同作用，会系统性导致感知偏差远离这些精确的“锚点”方向，即表现为排斥偏差的增强。我们的计算模型成功地将这一系列复杂的心理物理现象，统一到了一个简洁的计算框架之中。”

希望上述修改在一定程度上，能够提升本文的可读性，但确实，需要较高的数学基础。这一点还请专家谅解。

意见 2：根据实验 1 的结果，实验 1 最终使用的长期先验信息与实验刺激分布（即短期先验信息）是吻合的。从这个角度看， ω_{stim} 在本实验中的意义有限。当然实验 2 及其结果较好的解决了这一问题，使其并不影响最后结论。不过本人认为这一问题有必要进行更加细致的说明，包括在实验 1 的讨论部分和实验 2 的研究动机阐释上。

回应：衷心感谢您提出的深刻意见。您准确地指出了实验 1 中由于长时与短时先验一致所导致的模型解释模糊性，以及参数 ω_{stim} 在该情境下鉴别力有限的问题。我们完全赞同这一分析，并认为对此进行明确说明将使研究的逻辑链条更加严谨。

遵照您的建议，我们已在文中进行了两处关键补充：

1. 在实验 1 的建模结果部分，我们新增了一段说明，坦诚地指出了在无冲突设计下，区分“纯长时先验”与“高度加权短时的整合模型”存在的困难，从而明确了实验 1 自身的局限性。“然而，需要指出的是，实验 1 采用的刺激分布（短时先验）与我们假设的、基

于日常经验的四峰长时先验在统计形态上是一致的。这种“无冲突”的设计，虽然纯净地揭示了内部噪音的调节作用，但也带来了一个关键的模型解释模糊性，即，当长时与短时先验相似时，一个“仅使用长时先验”的模型与一个“赋予短时先验较高权重的整合模型”可以做出相近的行为预测。这正是实验中包含四峰长时先验和加权整合先验的模型均能较好拟合数据的原因。因此，仅凭实验 1 的结果，我们难以明确感官系统在加工 PLW 方向时，究竟是纯粹依赖稳定的长时经验，还是会动态地整合实验情境中即时的统计信息。为厘清上述先验利用的具体策略，实验 2 将通过操纵刺激分布，主动在短时先验与假设的长时先验之间制造系统性冲突，从而对两种策略做出更具鉴别力的检验。

2. 在实验 2 的引言部分，我们强化了研究动机的阐述，明确指出实验 2 正是为了直接解决上述模糊性而设计的“冲突实验”，并清晰列出了两种先验利用策略在冲突情境下可检验的竞争性预测。“实验 1 的结果确立了内部噪音对 PLW 方向估计的影响，并支持了高效编码贝叶斯解释框架。然而，由于该实验中短时先验（刺激分布）与假设的长时先验一致，我们未能清晰鉴别系统所依赖的先验具体是长时经验、短时经验还是二者的整合（参见 2.4 最后一段）。为直接解决这一遗留问题，实验 2 旨在创设一个先验冲突的情境，以检验 PLW 方向估计中的先验利用策略。

实验 2 的方法与实验 1 基本一致，关键区别在于将刺激分布的峰值（即短时先验）重新定位至倾斜方向（ $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ ），如图 1c 右图实线所示。这使得实验 2 中的短时先验与实验 1 所提出的四峰长时先验（峰值位于 $0^\circ, \pm 90^\circ, 180^\circ$ ）产生系统性冲突。在此冲突设计下，两种先验利用策略将做出竞争性的、可检验的预测：(1) 若感知系统动态整合短时经验，则应显著依据新的刺激分布进行调整，模型中的整合权重参数 ω_{StimDist} 将趋近于 1；(2) 若系统优先或纯粹依赖从长期生态经验中固化的长时先验，则其估计应抵抗短时分布的干扰， ω_{StimDist} 将趋近于 0。因此，实验 2 通过对参数 ω_{StimDist} 的估计，为判断系统在先验冲突时采取何种策略提供了决定性的证据。”

这些修改不仅回应了您的关切，也使从实验 1 到实验 2 的递进逻辑（从“确立框架”到“厘清机制”）变得更为清晰和有力。再次感谢您的宝贵意见！

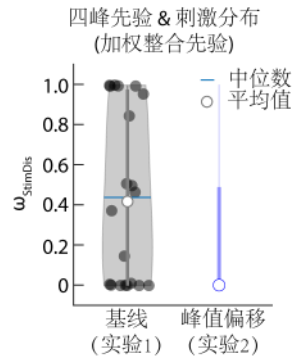
意见 3：实验 2 的研究结果报告过于简略。尽管两项实验方法与结构完全相同，但必要的结果说明还是需要的。尤其是对于其他参数的拟合结果，希望也能加入到实验 2 的结果报告上

回应：我们理解并赞同补充细节以增强透明度的必要性。为保持正文的简洁流畅，同时满足专家读者对完整信息的需求，我们采取了以下方式：

- 1) 在附录中提供完整结果：我们已将实验 2 的所有模型 k_{sensory} 和 α 参数的详细分布图进行了进一步讨论，系统性地整理至论文的附录图 5 部分。
- 2) 在正文中明确指引：在正文“3.4 计算建模结果”的结尾，我们添加了指引：“附录图 5 中提供了其他模型拟合参数结果描述及其相应结果讨论。”

意见 4：实验 2 中，参数 ω_{stim} 的分布存在较为明显的个体差异，在两端大幅波动。对于这一结果，本人认为有必要进行进一步分析，从个体差异的角度分析这一差异的原因与机制

回应：这个地方我们的上一版的图可能存在问题，导致您有所误解。我们修改了图 7，如下图所示：



灰色的是实验 1 的基线（800 毫秒条件），其有较大的个体差异，因为我们认为刺激分布与长时先验相同，所以难以区分。因此实验 2，将峰值偏移到了斜方向上，制造了刺激分布与长时先验的冲突，进而发现 ω_{stim} 为 0，因此，说明冲突条件下，被试完全依赖长时先验。该观点也在 3.4 部分进行了说明“为进一步验证，我们分析了 $\omega_{StimDist}$ 的分布 (图 7)。结果显示，峰值偏移分布条件下 $\omega_{StimDist}$ 的平均值趋近于 0，说明当刺激分布与长时先验冲突时，感觉系统仅使用四峰长时先验对 PLW 方向进行编码。”

意见 5: P4: "刺激越模糊或呈现时间越短，内部噪音越强，刺激在感官系统内表征的精确性越低。研究发现，当内部噪音增强时，刺激的估计值就会越远离先验分布的峰值，即表现出愈强的参考排斥偏差 (De Gardelle et al., 2010)。" 希望对这一点的理论原理进一步阐明

回应: 您提到此处很重要。但鉴于本段是对前人行为研究结果的总结，在此处进行原理论述有点突兀。因此，我们在后文计算模型段落，进行了解释。具体相关内容如下“基于这一理论框架，研究者们发展出了多种具体的计算模型以量化知觉过程 (见综述:孙琪, 2025)。例如，传统贝叶斯观察者模型直接描述了上述似然与先验的整合机制，且预测刺激信息不确定性增加时，知觉表征结果向先验峰值压缩的趋势愈加明显 (Knill & Richards, 1996; Mamassian & Landy, 2002)。而高效编码约束的贝叶斯观察者模型则进一步假设，感知系统的神经编码策略会依据环境统计 (先验) 进行优化，从而在似然与先验之间建立更紧密的理论联系 (Wei & Stocker, 2012, 2015, 2017)。最重要的是，该模型通过高效编码过程，将知觉表征结果远离先验峰值，且远离趋势随内部噪音的增加而增强。……”

意见 6: "(1) 感觉编码阶段。在该阶段，感官系统会按高效编码假设 (Attneave, 1954; Barlow, 1961) 将物理刺激 (θ) 转化为感官表征 (m)；该过程受到内部噪音的影响。表征结束后，其被映射回物理空间 ($\hat{\theta}$)，生成似然函数 ($p(m|\hat{\theta})$)" 这里请确认， $p(m|\hat{\theta})$ 是 $\hat{\theta}$ 还是 θ

回应: 感谢您细致的审阅。这个地方是 θ_{hat} ，因为映射回物理空间的特征值可能被扭曲，为做与真实的物理特征值 θ 作区分，标记为 θ_{hat} 。

意见 7: 图 4 不同色彩对应的条件没标

回应: 已补充。

意见 8: 图 5b 标错了，应该是三峰分布。

回应: 已修改。再次感谢您细致的指正！

最后，再衷心感谢您宝贵的指导建议，也希望上述回应能够解答您的问题，也期待进一步得到您的指导！祝您新年快乐，工作顺利，万事顺意！

第二轮

审稿人 1 意见：

非常感谢作者对审稿意见的认真回应。经过修改，论文整体质量已有明显提升，前言部分的逻辑结构也得到了显著加强。基于目前的修改情况，我认为文章已达到发表标准，建议发表。

意见 1：摘要中这句话：“为揭示上述影响作用的计算机制，基于不同假设构建了多种高效编码约束的贝叶斯观察者模型。”缺少主语，读起来不够通顺。建议作者对全文类似语句再做一次系统检查，以提高表达的准确性与可读性。

回应：感谢您的建议，已增加主语，并对文章类似表达进行修改。

意见 2：作者在描述不同实验条件下模型参数取值时，主要采用了定性描述，但缺少统计层面的量化报告。建议至少在补充材料中提供相关参数的统计分析结果，以增强结论的严谨性。例如文中提到：“另外，先前研究表明感觉噪声的大小会随刺激呈现时间的缩短而增加，由此预期 250 毫秒条件下的 κ sensor 值将小于 800 毫秒条件下的值。图 4b 符合预期假设。”

回应：感谢审稿人高质量建设性建议。在本次修改中，我们采用置换检验进行了统计分析，并在正文中直接汇报 P 值。

再次，感谢您的支持！愿新年万事顺遂！

审稿人 2 意见：

作者已经充分回应了我的审稿意见，并对文本进行了恰当修改。同意发表

回应：感谢审稿人拨冗审阅，并基于肯定支持，预祝新春快乐，阖家幸福安康！

编委意见：同意发表。

主编意见：同意外审和编委意见，建议按外审要求修改后录用。