

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：不确定性和预期有效性对运动方向感知决策的影响

作者：潘玥安，姜云鹏，郭茂杰，吴瑕

第一轮

审稿人 1 意见：

研究探讨了不确定性和线索有效性对方向判断决策的影响。论文得出的结果，符合预期和常识。我认为可能改进的点如下。

意见 1：

论文的问题提出和实际意义定位在驾驶员对行人运动方向的判断，有些牵强。因为在交通场景中的运动方向判断首先取决于行人的面部朝向和腿部动作，并不是如实验中所设置的随机运动的点。也极少存在某个行人群体在其他人群中却只需要判断该人群的朝向的情形。所以，我认为可能需要重新思考问题的提出角度。

回应：

感谢审稿人的建议。实际应用的意义更多是本研究可能的应用拓展，的确不能完全和实验范式匹配。运动感知决策是指在多个对感觉刺激的推测中做出选择并执行动作反应，本研究中随机运动的点是为了更好的控制不确定性和考察运动感知决策的准确性。在修改稿最后，我们提出了未来可能的研究进展：“未来可以进一步考察不确定性和预期有效性对不同特征（如衰老、驾龄等）的驾驶员在模拟驾驶中的运动方向感知决策的影响，以此进行更好的现实应用。”

此外，为了体现本研究的基础研究属性，使读者对其应用意义有更准确的认识，修改稿中对研究的意义进行了修正，删减了前言中的实际应用部分，突出问题提出的理论意义和价值，即第二段引入不确定性，第三段引入预期有效性，第四段引入两者的关系及其对运动感知决策的影响。

同时，为了增加本研究的可扩展性，在讨论部分补充内容如下：“探讨信息不确定性和预期有效性对运动感知决策的共同影响，有助于解释交通事故发生与预防。根据情景意识理论（the theory of situation awareness, Endsley, 1995），驾驶者完成与行人的安全交互（safe interaction）需要完成三个层面的认知过程：侦测到行人、察觉行人的运动意图和预测行人的后续运动。关于前两个认知过程的研究较为充分（Vlakveld et al., 2018; Yuan et al., 2020），而本研究主要对预测行人的后续运动过程进行探讨，考察的是驾驶者在复杂路况中如何预判运动物体方向并准确反应。如在大雾等能见度较低的天气，运动刺激的不确定性较高，此时驾驶员的方向感知决策会同时受到不确定性和先验预期的影响。根据本研究结果，驾驶员需要适当增加自身对先验信息的利用，如避免疲劳驾驶，提高对交通灯和指挥员的关注，以及开启导航，即使是熟悉路段。因此本研究有利于解释驾驶者如何根据路况或天气等外部环境的不确定性，调整对来往车辆或行人运动方向的预测和感知，为理解和预防交通事故提供理论支持。”

意见 2：

既然以往研究已经对运动方向感知建立了比较符合事实的计算模型，说明该领域已经很

成熟,本论文的创新点在哪里?作者在问题提出是说以往研究没有对不确定性大小做出控制,那么计算模型中对于该变量的设置是如何确定的?作者提到的创新点是预期效应随着不确定性提高而增加,但似乎没有讲清楚预期效应的衡量指标是什么

回应:

感谢审稿人的意见。关于计算模型,讨论部分提到的贝叶斯模型更强调个体根据预期来调整感知内容,但该模型并未讨论个体如何结合感觉不确定性和预期对感知内容进行整合(即本研究的目的)。为了更好的解释前人模型和本研究的关系,在讨论的第三段,我们增加了关于贝叶斯模型的解释和本研究与之前模型相比的创新之处:

“此外,本研究发现预期有效性影响方向感知决策,PR 随有效性增加而提高,即出现预期效应。该结论将预期效应拓展到了运动方向感知决策领域。在推理性感知领域,研究普遍认为预期效应的内在机制是贝叶斯推理(Clark, 2013; de Lange et al., 2018),即个体不仅利用先验信息(如刺激的先验概率)促进感知,还会将即时信息与先验信息对比,根据其不一致程度(预期错误, prediction error)更新后续预期(Aitchison & Lengyel, 2017),因此能够灵活优化整个推理性感知过程(Chalk et al., 2010; Clark, 2013; Zhang et al., 2019)。在方向感知决策领域也存在对预期效应机制的研究。Sotiropoulos 等人(2011)发现个体的预期会随着刺激频率更新,进而优化运动刺激的方向感知。这与贝叶斯模型所描述的行为特点一致。Kok 等人(2013)发现 RDPs 任务中音调线索引起的初级视觉皮层的激活模式也符合贝叶斯推理模型。以上结果说明,在方向感知领域也存在预期效应,且其内部机制符合贝叶斯推理,即个体利用环境中与运动刺激相关联的先验信息优化运动刺激的感知决策。然而,正如引言部分所述,以往研究忽视了“刺激本身的频率”(Sotiropoulos et al., 2011)或者“提示固定方向的线索”(Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013)可能引起练习效应。本研究没有将颜色或音高与固定方向简单对应(Kok, 2013),而是令箭头线索在 0 到 360 度的范围内随机指示,更接近现实中的运动反向感知情境,提高了研究的外部效度。同时,本研究中的线索的有效性跟颜色的对应关系并未事先告知被试,且在练习阶段只反馈给被试其判断的误差角度,不包括箭头线索是否预测准确。因此,预期效应的出现说明被试在实验过程中逐渐完成了对预期的修正,这符合贝叶斯推理模型对个体行为的描述。因此,本研究对预期效应的贝叶斯推理在方向感知领域进行了拓展和延伸。”

本研究的创新之处主要体现为对刺激不确定性和预期有效性两个因素的结合,为了更好地体现研究的意义和价值,我们在问题提出的第四段对两者结合的意义及其理论基础进行了补充:“然而,当前刺激的不确定性与先前线索的预期有效性如何影响运动方向感知决策尚不清楚。双重控制机制(the dual mechanisms of control, DMC, Braver, 2012)认为,信息加工系统有两种功能不同的认知加工模式:主动性控制(proactive control)发生在感知任务之前,通过持续保持任务目标以优化感知过程,从而促进被预期地刺激的加工;反应性控制(reactive control)则在刺激出现后根据任务需要进行即时的处理,从而激活目标信息加工流程。刺激的不确定性能够改变信息的信噪比,从而影响感知决策,属于反应性控制;预期有效性出现在刺激之前,并被保持在工作记忆中,根据任务目标来影响感知决策,属于主动性控制。目前,两种加工模式的关系并未达成共识。一些研究认为反应性控制与主动性控制具有各自弥补、相互取代的关系(Burgess & Braver, 2010; Speer et al., 2003)。研究发现,当预期到工作记忆负载较低时,个体倾向于采用主动性控制策略,使用先前工作记忆中的内容为后续感知做准备;相反,当工作记忆负载被预测较高,个体则利用即时刺激进行处理(Speer et al., 2003)。脑成像研究也发现,两种加工模式分别对应不同的脑结构,主动性控制与外侧前额叶皮层(lateral prefrontal cortex)的激活有关,而反应控制则与前扣带皮层(Anterior Cingulate Cortex, ACC)的激活有关(Botvinick et al., 2001)。然而,后续研究发现两种认知模式的任务中有相同的大脑结构激活,如额顶网络(fronto-parietal network)、带状盖网络

(cingulo-opercular network) 以及纹状体 (striatum) 等广泛区域 (Wu et al., 2020), 因此认为两种模式有共同的成分, 能够协同地工作。因此, 考察不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的影响, 不但能够探究先验信息与感觉信息的整合机制, 也能为反应性控制与主动性控制的关系提供进一步的证据。”

最后, 为了更加明确预期效应的衡量指标, 我们在摘要“预期效应 (PR 高有效性—PR 低有效性)”、引言“预期效应体现为预期有效时的个体感知表现好于预期无效时 (de Lange et al., 2018; Yanagisawa, 2019)”“结果发现, 被试对有线索提示的方向的准确率显著高于未被提示的方向, 说明方向感知决策中存在预期效应,”结果“对高、低不确定性下的预期效应 (PR 高有效性—PR 低有效性) 进行配对样本 t 检验。”部分均增加了预期效应的定义和指标说明。

意见 3:

判断的准确性采用 PR 衡量, 有点难懂, 为何要和 90 度条件对比而不用原始偏差值?

回应:

感谢审稿人的意见。PR 的目的是对被试反应的误差角度进行标准化。由于被试在判断散点方向时, 最小误差为 0 度, 最大误差为 180 度, 假设被试无法判断方向, 进而做出随机反应, 那么该被试足量反应后的均值应为 90 度。即无法判断方向的被试的误差角度均值为 90 度。因此, 将被试的误差角度与随机反应的均值角度作比较, 可以更直观的得到该被试的正确程度: 假如某被试的误差角度高达 80 度, 那么 $100\% \times |90-80| / 90 = 11\%$, 该被试的正确程度为 11%。所有的被试的正确程度在 0%~100% 之间。在修改稿中, 我们增加了对 PR 值计算标准的解释: “由于被试在判断散点方向时记录误差不分顺时针和逆时针, 最小误差为 0°, 最大误差为 180°, 因此无法判断方法、完全猜测情况下的误差均值为 90°, 故转化公式为 $PR = 100\% \times (90^\circ - \text{误差角度}) / (90^\circ)$ 。例如某次被试反应的误差角度 (反应的方法与相干点运动方法的角度差) 高达 80 度, 那么 $PR = 100\% \times (90^\circ - 80^\circ) / (90^\circ) = 11\%$, 则该被试的反应准确度仅为 11%。”

意见 4:

问题提出部分, 高低音频那个研究, 没看明白和本文之间的关系, 可否进一步阐述?

回应:

感谢审稿人的提问。具体来说, 在 Aitken 等 (2020) 和 Kok 等 (2013) 的研究中, 虽然同样采用了 RDPs 作为目标刺激屏, 但与本研究不同的是, 他们采用的线索不是红色和绿色的箭头, 而是高、低音频, 不具有指向方向的功能, 因此只能与两个固定的方向对应, 而不是本研究中线索的方向随机, 因而无法避免对这两种方向的练习效应。修改稿中我们对这两篇文献及其与本研究的关系进行了修正: “除了目标刺激的频率, 目标刺激的线索也能促进方向感知。通过习得环境线索的规律, 个体能够利用先验信息做出对模糊运动刺激的方向预期, 以此弥补运动刺激信息的不足。有研究发现了线索形成的预期效应 (Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013)。被试需要报告以随机方向运动的散点的整体运动方向。在目标刺激之前呈现高、低音线索, 两种声音分别对应两个固定方向。结果发现, 被试对有线索提示的方向的准确率显著高于未被提示的方向, 说明方向感知决策中存在预期效应, 个体可以利用先验信息对运动刺激进行方向感知决策。然而, 以往研究中提示的方向是固定的, 无法排除线索与特定方向感知的固定联系所带来的练习效应。因此, 来自预期有效性的先验信息如何影响运动方向感知决策有待进一步考察。”

意见 5:

线索有效性越高, 判断准确性越高, 这是否是因为注意的调控引起的。本文中的线索为

箭头，本来就会引导注意分配，如果时间有限，可能有效线索更受益，这和传统选择性注意研究中的线索有效性有什么关系？

回应：

感谢审稿人的提问。修改稿中对两种有效性的区别进行了讨论：“此外，线索预期有效性可能是由于对线索的注意调控引起的。然而，传统选择性注意研究中的线索有效性是对线索和目标空间位置的注意引导（无论是外源性还是内源性线索），线索和目标都具有空间性，因此对线索的（外源性或内源性）注意会影响对目标的判断。而本研究的预期有效性是关联性学习的产物，即线索的颜色代表高低有效性，而颜色箭头的朝向和目标的朝向有概率（90%或10%）保持一致。线索具有直接指向的方向性，但目标的运动朝向是通过对相关点的运动方向感知决策来确定的，线索与目标的空间及物理属性均不相同。因此，对线索的注意分配不会影响对目标散点朝向的判断，结果的差异也不是由于注意的调控引起的。为了和传统的线索有效性进行区分，本研究均采用“预期有效性”来描述由线索和目标运动方向的关联引发的预期效果。总的来说，本研究区分与空间线索有效性，对预期效应的贝叶斯推理在方向感知领域进行了拓展和延伸。”

意见 6：

实验一的目的写在了 2.3，我认为放在 2.1 之前更容易理解

回应：

感谢审稿人的提议。修改稿中已将实验一的实验目的从 2.3 末尾移动到实验一标题下面的单独段落中，以方便读者理解。

意见 7：

Situation awareness，一般翻译为情境意识理论；

回应：

感谢审稿人意见，已在修改稿中进行了修改。

意见 8：

图 3 中，实验流程的文字在图下方，而线索有效性无效性的标识在图上方，且图和文字的间距完全一样，看的时候容易出错、混淆。建议将地有效性和线索无效的图形及其说明与下面的流程图分隔更远些

回应：

感谢审稿人的建议，已在修改稿中做出修改，一方面，对图 3 中预期有效性无效性的标识换到了图下方，另一方面，增加了图和表及其题注与正文之间的距离，使文章的阅读更加顺畅，减少混淆。

.....

审稿人 2 意见：

该研究问题本身有一定意义，但文章的创新型性一般，研究内容不够详实，讨论部分的逻辑性不够严密且推论过于宽泛，在一定程度上影响了文章的信度。此外，文章缺少结论，文字错漏较多。以下几点意见或疑问供作者参考。

意见 1：

摘要的最后一句“研究结果证实了预期不确定性对线索有效性的作用，深入地考察了方向感知决策机制，为交通领域的事故预防提供了实证支持。”为病句。

回应：

感谢审稿人的意见。摘要最后一句确实表达不当，已修改为“研究为双重控制机制（DMC）理论下主动性与反应性控制协同的观点提供了实证支持，并为交通事故的解释与预防提供了理论依据。”

此外，修改稿中增加了讨论部分的逻辑性和严密性，讨论的第一段总结研究意义，第二段突出两者因素的交互作用，第三段讨论不确定性的影响，第四段讨论预期有效性的影响。此外，修改稿中增加了结论部分。

意见 2：

参考文献中近五年内文献仅有 6 篇，占比较少。

回应：

感谢审稿人的意见。修改稿中增加了近五年内文献，比例调整至总参考文献的 30%。

意见 3：

题目与研究内容不完全匹配。文章题目为“不确定性对运动方向感知决策预期效应的影响”。但实际上，实验二探讨的是“不确定性与线索有效性对感知决策预期效应的共同影响。”建议题目及关键词最好能够体现这两个关键因素。

回应：

感谢审稿人的意见。题目、关键词的确应与研究内容吻合，而原标题并不能表现出实验设置中“不确定性”与“预期有效性”两个因素。因此我们对题目做出了修改“不确定性和预期有效性对运动方向感知决策的影响”。

意见 4：

全文缺少结论。

回应：

感谢审稿人的意见，我们已经在文末补充了结论：“本研究采用 RDPs 范式及其变式，发现运动刺激的方向感知准确度随不确定性增加而降低；此外，方向感知准确度也随预期有效性增加而提高，这一结果验证了方向感知领域的预期效应。更重要地是，研究发现预期效应随不确定性的提高而增加，表明了先验信息的有效性与感觉信息的不确定性能够在方向感知决策中整合，为主动性控制与反应性控制协同工作提供了实证支持。此外，本研究也为交通事故的发生与预防提供了理论依据。未来可以进一步考察不确定性和预期有效性对不同特征（如衰老、驾龄等）的驾驶员在模拟驾驶中的运动方向感知决策的影响，以此进行更好的现实应用。”

意见 5：

引言部分第四段“其他影响个体表现的参数则保持一致”。这里提到的其他影响因素是指哪些？是否会对实验结果产生干扰？

回应：

感谢审稿人的意见。“其他影响个体表现的参数”是指 RDPs 的程序编写中除散点比例外影响个体误差角度的其他因素，如散点的移动是几帧移动一次，以及干扰点是以固定方向直线移动，还是每一次动态移动都在屏幕中随机出现等基础参数。为了和前人的研究作对比，本研究的这些参数均和前人研究保持一致。此外，这句话会给读者产生困惑，认为这些参数会对实验结果产生影响和干扰，而这些参数本身是需要控制的额外变量，因此不适合放在引言部分，修改稿中我们将参数的具体值放在了方法部分：“参照前人研究（Pilly & Seitz, 2009；

Ho & Giaschi, 2009; Newsome & Department, 1998), 白色散点的直径为 0.1°; 对比度为 117.0 cd/m²。中央注视点为白色 (RGB 255, 255, 255), 直径 0.3°。背景为黑色 (RGB 0, 0, 0), 对比度 4.5 cd/m²。圆形外环为白色 (RGB 255, 255, 255), 直径 15°, 对比度 117.0 cd/m², 外环的粗细为 4 像素。”

意见 6:

作者在讨论部分第四段提到“先验信息与感觉信息不仅能够有效整合, 还受到不确定性的调节。本研究发现随着不确定性增加, 预期效应也随之增强。这种促进作用可能是因为感觉信息在高不确定性时具有更低的信号或更强的噪声, 即更低的信噪比, 而线索越有效, 则越能弥补低信噪比导致的不准确感知。”按照作者的表述, 个体在高不确定水平, 预期效应增加, 是因为高不确定性导致信噪比更低, 判断准确性更低, 是线索有效性 (而不是不确定性) 调节了预期效应。

回应:

感谢审稿人的意见。对于不确定性和预期效应关系的解释有不清楚的地方。修改稿中我们补充了可能的原因: “研究发现, 预期效应随不确定性增加而提高, 说明感觉信息的不确定性和先验信息的预期有效性均会在运动方向感知决策中产生作用, 两者在同一认知过程中彼此整合、互相影响。这种同一认知过程可能是认知控制 (cognitive control) 过程, 认知控制是一种高级的认知加工的核心功能, 它能够在不确定的环境中协调心理操作, 选择并优先处理重要信息 (Wu et al., 2020)。不同预期有效性的线索导致会线索正确预测目标的概率变低, 个体可能面临因线索失效而导致的感知误差 (Mushtaq et al., 2011; Yu & Dayan, 2005)。同时, 感觉信息在高不确定性时具有更高的信噪比 (更低的信号或更强的噪声)。因此, “不确定性”不只是感觉信息引起的反应性控制, 也可能是由预期有效性导致的主动性控制。当感觉信息不确定性低时, 反应性控制足以完成任务, 因此预期效应较小; 而当感觉信息不确定性高时, 则需要主动性控制加入来共同完成任务, 因此预期效应更大。”

意见 7:

作者在该研究结果中, 提到“随着预期有效性的提高, 感知的准确程度也相应增加, 出现了与前人结果一致的预期效应。”“运动方向的感知决策也受到不确定性的影响。本研究发现随着相干点比例的增加, 被试的反应准确度提高, 这与前人的研究结果一致”。如此读者自然会疑问: 既然本结果都与之前研究一致, 那么本研究的创新性体现在哪里? 作者应该关注的一点是: 在排除“其他影响个体表现的参数”后, 不确定性与线索有效性对运动方向感知决策预期效应的影响孰轻孰重。

回应:

感谢审稿人的意见。之前的讨论部分的确过于强调与前人结果的一致性, 没有突出本研究的创新之处。在修改稿中, 为了更加突出本研究的创新性, 突出不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的整合影响, 我们在讨论第二段就论述了两种因素的交互作用的重要意义: “研究发现, 预期效应随不确定性增加而提高, 说明感觉信息的不确定性和先验信息的预期有效性均会在运动方向感知决策中产生作用, 两者在同一认知过程中彼此整合、互相影响。这种同一认知过程可能是认知控制 (cognitive control) 过程, 认知控制是一种高级的认知加工的核心功能, 它能够在不确定的环境中协调心理操作, 选择并优先处理重要信息 (Wu et al., 2020)。不同预期有效性的线索导致会线索正确预测目标的概率变低, 个体可能面临因线索失效而导致的感知误差 (Mushtaq et al., 2011; Yu & Dayan, 2005)。”

同时, 感觉信息在高不确定性时具有更高的信噪比 (更低的信号或更强的噪声)。因此, “不确定性”不只是感觉信息引起的反应性控制, 也可能是由预期有效性导致的主动性控制。

当感觉信息不确定性低时，反应性控制足以完成任务，因此预期效应较小；而当感觉信息不确定性高时，则需要主动性控制加入来共同完成任务，因此预期效应更大。脑成像的研究也发现，刺激不确定性和预期有效性具有脑区激活的广泛重叠。如 Mushtaq 等（2011）发现，预期不确定任务与认知控制任务在背外侧前额叶（dorsolateral prefrontal cortex , DLPFC）、后顶叶皮层（posterior parietal cortex , PPC）、前扣带回皮层（Anterior Cingulate Cortex , ACC）等区域均有激活。因此，本研究通过探究预期有效性与不确定性的整合机制，说明了主动性控制和反应性控制涉及相同加工过程，支持了主动性控制与反应控制协同工作的假设（Wu et al., 2020）。”

此外，在讨论部分，我们也增加了本研究的价值和意义：“此外，本研究发现预期有效性影响方向感知决策，PR 随有效性增加而提高，即出现预期效应。该结论将预期效应拓展到了运动方向感知决策领域。”“本研究没有将颜色或音高与固定方向简单对应（Kok, 2013），而是令箭头线索在 0 到 360 度的范围内随机指示，更接近现实中的运动反向感知情境，提高了研究的外部效度。”“同时，本研究发现刺激的不确定性也会影响运动方向感知决策，PR 随着不确定性提高而降低。虽然以往研究发现，相干点比例的降低不利于被试的方向感知准确率（Pilly & Seitz, 2009; Maanen & Grasman, 2012），然而其并未对相干点比例进行合适的选取，也并未对不确定性的加工机制进行深入探讨。”

.....

审稿人 3 意见：

意见 1：

文章在问题提出部分引用了高低音频的研究，但该研究是听觉的研究，视觉方向感知和听觉方向感知是不同的，可能不具有直接的参考或根据听觉方位感知推断视觉方位感知。

回应：

感谢审稿人的意见。听觉实验的确和视觉方向感知是不同的。我们修改了对两篇引文的描述：“有研究发现了线索形成的预期效应（Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013）。被试需要报告以随机方向运动的散点的整体运动方向。在目标刺激之前呈现高、低音线索，两种声音分别对应两个固定方向。结果发现，被试对有线索提示的方向的准确率显著高于未被提示的方向，说明方向感知决策中存在预期效应，个体可以利用先验信息对运动刺激进行方向感知决策。然而，以往研究中提示的方向是固定的，无法排除线索与特定方向感知的固定联系所带来的练习效应。因此，来自预期有效性的先验信息如何影响运动方向感知决策有待进一步考察。”

意见 2：

在第三段末尾提到“感觉信息的整合过程”，具体影响哪些信息的整合？

回应：

感谢审稿人的意见。此处由于写作时采用了不恰当的省略而产生歧义。修改稿中已经改为“感觉信息与先验信息的整合”。

意见 3：

从问题提出的阐述上理解，实验一与实验二研究的问题是两个相对独立的问题，补充阐述一下两个问题之间的内在联系？

回应：

感谢审稿人的意见。修改稿中在引言部分阐述了两个实验的内在联系：“由于高、低不

确定性缺乏在 RDPs 范式中对应的相干点比例，实验一采用 RDPs，比较 6 种相干点比例（100%、80%、70%、60%、20%、0%）的方向感知准确度，并选出高、低两个相干点比例分别作为低、高不确定性的参数。在此基础上，实验二将 RDPs 和线索范式结合，考察预期有效性与不确定性的共同影响。”

意见 4:

关于相干点的 6 种比例，先验概率设置的依据？概率变化的间隔设置的依据与合理性？高低先验概率和不确定性程度对应的关系的合理性？为什么不加一个 50% 的概率作为随机概率基线？

回应:

感谢审稿人的意见。选择高、低不确定性的比例的标准为：高、低不确定性下被试表现差异显著，且均与完全确定（100%）和完全不确定条件（0%）差异显著。因此，相干点比例的设置包括 0% 和 100%，以及不太有把握，需要根据数据结果确定的比例。根据前人的文献参考（Singh & Fawcett, 2008），我们选取了 80%，70%，60% 作为低不确定性可选的比例，选取了以往研究（Kok et al., 2013）比较认可的 20% 作为高不确定比例。因此，最后的相干点比例变化为 100%、80%、70%、60%、20%、0%。

此外，对于 RDPs 来说，如果所有散点的运动方向都是随机的，那么相干点（方向一致的点）的比例是 0%。50% 的概率是指有 50% 的点运动方向一致，而不是指所有散点有一半的可能性朝同一方向运动。因此，本研究采用 0% 作为随机概率基线，要求选择的高、低不确定性的比例要与随机概率表现出显著差异，以此避免地板效应。

意见 5:

为实验一和实验二添加标题。

回应:

修改稿中为实验一和实验二分别增加了标题“实验一：不同比例的相干点对运动方向感知决策的影响”和“实验二：不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的影响”。

意见 6:

在引言末尾部分，补充阐述一下研究问题的理论与实践创新性及其贡献、意义与价值？

回应:

感谢审稿人的建议。我们在引言的最后阐述了研究的理论假设“如果不确定性和预期有效性存在交互作用，即在同一任务中彼此影响，则说明先验信息与感觉信息能够在运动感知决策中进行整合，则反应性控制和主动性控制可能作用于相同加工过程。反之，则说明两种控制机制独立作用。”此外，在讨论的第一段和最后一段，分别阐述了研究的理论意义“结果表明，模糊的方向信息增强背景环境信息的作用，也证明了感觉信息的不确定性与先验信息的预期有效性能在运动方向感知决策中整合，进而对主动性控制与反应性控制协同工作的观点提供了支持。”“探讨信息不确定性和预期有效性对运动感知决策的共同影响，有助于解释交通领域的事故发生与预防。”

意见 7:

在两个实验中，均在方法部分提到被试年龄的标准差，其英文缩写是 SE 还是 SD？

回应:

感谢审稿人指出的错误，原文中的“SE”是错误的，应改为“SD”，即标准差。已在修改稿中做出了修正。

意见 8:

报告黑白颜色的 RGB 函数或其他颜色模型参数?

回应:

修改稿中补充了颜色的 RGB 值, 其中, 黑色 RGB (0, 0, 0), 白色 (255, 255, 255), 红线索色 RGB (255, 0, 0), 绿色线索 RGB (0, 176, 80)。

意见 9:

报告圆环线条的参数?

回应:

修改稿中报告了圆环的参数“圆形外环为白色 (RGB 255, 255, 255), 直径 15°, 对比度 117.0 cd/m², 外环的粗细为 4 像素。”

意见 10:

动态刷新的频率参数?

回应:

修改稿中报告了运动散点的“动态刺激的刷新频率为 20Hz。”

意见 11:

相干点运动方向是直线运动? 干扰点方向随机变化运动还是随机角度直线运动? 点刺激的数量是都有变化, 如何控制数量和密度?

回应:

感谢审稿人的意见。散点中相干点和干扰点的运动均是直线运动, 相干点运动方向一致, 干扰点运动方向随机。所有散点出现的位置是完全随机的, 因此不会出现某一方向上的散点数量和密度过大的问题。修改稿中对散点运动进行了补充: “散点出现在黑色背景正中的圆形外环内的随机位置, 朝某个方向直线运动, 速度为 3°, 动态刺激的刷新频率为 20Hz。”“在散点呈现过程中, 有一定比例的点运动方向一致 (相干点), 其余的点则以相同速度朝随机方向直线运动 (噪声点)。”

意见 12:

关于“共 384 个试次 (6 种不确定水平×8 种相干点运动方向×8)”, 这个 8 是每个条件下的次数? 设置的依据和数量是否够足够达到数据稳定, 降低随机误差?

回应:

感谢审稿人的意见。最后的 8 是每个条件下的次数, 因为 8 种相干点运动方向是控制条件, 并不是本研究的自变量, 因此单因素 6 水平实验设计中, 每种条件下为 8×8=64 个试次, 是能够达到数据稳定并减低随机误差的。

意见 13:

关于“说明 60%适合作为低不确定性的相干点比例的分界线”, 从概率论角度理论上 50%是随机概率的分界点, 实验中没有 50%。另外, 60%和 20%的概率间隔变化比较大, 是否考虑中间 20-60%概率条件下的变化趋势?

回应:

感谢审稿人的意见。对于 RDPs 来说, 如果所有散点的运动方向都是随机的, 那么相干点 (方向一致的点) 的比例是 0%。50%的概率是指有 50%的点运动方向一致, 而不是指所有散点有一半的可能性朝同一方向运动。因此, 0%是随机概率基线。此外, 因为实验一的

目的是寻找高、低不确定性的比例，要求两种比例的被试表现差异显著，且均与完全确定（100%）和完全不确定条件（0%）差异显著。结果发现，60%和20%表现差异显著，因此达到实验目的，为高、低不确定性选取了合适的比例。而20-60%概率条件下的变化趋势并不是本实验的研究目的，因此没有设置更多更复杂的比例进行考察。

意见 14:

解释一下，在实验二的结果部分，为什么高低有效性的SD变异高，比低有效性变化更大的原因？

回应:

高有效性的SD更大可能是线索与运动方向关联学习的过程，即最开始被试没有学习到线索和运动方向的关系，因此高低有效性的线索之间差异不大，随着实验进行，被试学习并能够利用线索和运动方向之间的关系，因此高有效性时表现变好，低有效性时表现变差，从而使SD变大。

意见 15:

正文中报告的平均数 \pm 后面的是SD还是SE？实验一结果部分也做出相应解释说明。

回应:

感谢审稿人意见。原文中平均数 \pm 后面的是“SD”，修改稿中进行了说明。

意见 16:

在讨论部分，讨论不确定性的影响这一段的首句，先验信息与感觉信息不仅能够有效整合，是“还受到不确定性的调节”，还是“一个重要的影响因素”？看怎么阐述更确切？

回应:

感谢审稿人的意见。原文使用“还”确有歧义，修改稿中对讨论不确定性这一段进行了修改：“此外，研究发现刺激的不确定性会影响运动方向感知决策，PR随着不确定性提高而降低。虽然以往研究发现，相干点比例的降低不利于被试的方向感知准确率（Pilly & Seitz, 2009; Maanen & Grasman, 2012），然而其并未对相干点比例进行合适的选取，也并未对不确定性的加工机制进行深入探讨。……”

意见 17:

在文章倒数第二段，可以补充讨论研究结果的理论创新与贡献，同时补充具体的现实意义讨论，可以从更多的实践场景中阐释和解释，突出基础研究的实践意义与价值。

回应:

感谢审稿人的意见。修改稿中补充了研究结果的理论创新和贡献：“研究发现预期效应随不确定性增加而提高，说明感觉信息的不确定性影响先验信息的预期有效性在运动方向感知决策的作用，表明两者在同一认知过程中彼此整合、互相影响，进一步证明主动性控制与反应控制协同工作。”“因此，预期效应的出现说明被试在实验过程中逐渐完成了对预期的修正，这符合贝叶斯推理模型对个体行为的描述。因此，本研究对预期效应的贝叶斯推理在方向感知领域进行了拓展和延伸。”

同时也补充了现实意义：“探讨信息不确定性和预期有效性对运动感知决策的共同影响，有助于解释交通事故发生与预防。根据情景意识理论（the theory of situation awareness, Endsley, 1995），驾驶者完成与行人的安全交互（safe interaction）需要完成三个层面的认知过程：侦测到行人、察觉行人的运动意图和预测行人的后续运动。关于前两个认知过程的研究较为充分（Vlakveld et al., 2018; Yuan et al., 2020），而本研究主要对预测行人的后续运动

过程进行探讨，考察的是驾驶者在复杂路况中如何预判运动物体方向并准确反应。如在大雾等能见度较低的天气，运动刺激的不确定性较高，此时驾驶员的方向感知决策会同时受到不确定性和先验预期的影响。根据本研究结果，驾驶员需要适当增加自身对先验信息的利用，如避免疲劳驾驶，提高对交通灯和指挥员的关注，以及开启导航，即使是熟悉路段。因此本研究有利于解释驾驶者如何根据路况或天气等外部环境的不确定性，调整对来往车辆或行人运动方向的预测和感知，为理解和预防交通事故提供理论支持。”

意见 18:

这个任务可能不太适合 ERP 研究，这里可以对未来研究的展望做些可行性的具体阐述。另外更正一下：事件相关电位和脑成像不是一种技术。

回应:

感谢审稿人的意见。修改稿中删除了 ERP 和脑成像等关于未来研究的展望，并增加了对未来研究的展望“未来可以进一步考察不确定性和预期有效性对不同特征（如衰老、驾龄等）的驾驶员在模拟驾驶中的运动方向感知决策的影响，以此进行更好的现实应用。”

意见 19:

最后给出具体的几点结论。

回应:

感谢审稿人的意见。修改稿中给出了结论：“本研究采用 RDPs 范式及其变式，发现运动刺激的方向感知准确度随不确定性增加而降低；此外，方向感知准确度也随预期有效性增加而提高，这一结果验证了方向感知领域的预期效应。更重要地是，研究发现预期效应随不确定性的提高而增加，表明了先验信息的有效性与感觉信息的不确定性能够在方向感知决策中整合，为主动性控制与反应性控制协同工作提供了实证支持。此外，本研究也为交通事故的发生与预防提供了理论依据。未来可以进一步考察不确定性和预期有效性对不同特征（如衰老、驾龄等）的驾驶员在模拟驾驶中的运动方向感知决策的影响，以此进行更好的现实应用。”

第二轮

审稿人 1 意见:

经过作者修改，论文的逻辑和表达有提升，不过还有些地方需要修改。

意见 1:

作者在写作中使用太多不完整的表达，导致文章难懂，摘要尤其难懂。例如“结果选出 20%、60% 作为实验二中高、低不确定性的比例”。应为“根据实验一的结果，选出 20%，60% 的相干点比例设置实验二中散点群整体方向不确定性的高、低水平”。再比如，“实验一比较了不同相干点比例下的 PR（感知准确度）“感知准确度应在先，缩写应在后。其实，就本文的摘要长度来看，没必要使用缩写增加理解困难。

另外，随机点运动范式是一句话就能写清的范式，建议在摘要中提供，否则后面的内容如不确定性，感知准确度，相干点等都难以理解，会缩小目标读者群。当然，全文类似的问题有很多。很多时候我们对一个问题熟悉后就会自动地使用简称、代称写作，但这对读者是有挑战的。建议仔细检查全文。

回应:

感谢审稿人的意见。根据审稿人的意见，对摘要中的两个句子进行了修改，分别为“根据实验一的结果，选出 20%，60%的相干点比例来设置实验二中散点群不确定性的低、高水平。”和“实验一比较了不同相干点比例下的感知准确度”。在摘要部分，均使用感知准确度而不使用缩写。其次，为了减轻读者的阅读负担，我们在摘要处增加了随机点运动范式的介绍：“研究采用随机点运动范式，要求被试判断散点群的整体运动方向，方向一致的散点为相干点，其运动一致比例越低，不确定性越高”。

最后，为了避免简称、代称带来的阅读负担，我们仔细通读全文并做出了修改，如将前言部分“找到合适的相干点比例作为高、低不确定性的操作指标非常重要”改为“找到合适的相干点比例作为高、低不确定性的操作指标对于考察刺激不确定性的作用非常重要”；将方法部分“根据实验一的结果，将高、低不确定性的比例分别设为 20%和 60%”改为“根据实验一的结果，将对应高、低不确定性的相干点比例分别设为 20%和 60%”，将“选择高、低不确定性的比例的标准为...”改为“选择高、低不确定性的相干点比例的标准为...”；讨论部分将“实验一比较了 6 种相干点比例下运动方向反应准确度（PR），结果显示，60%和 20%的 PR 差异显著，且不存在天花板效应与地板效应，因此适合作为高、低不确定性的比例”改为“实验一比较了被试在 6 种相干点比例下对散点群整体运动方向的反应准确度（PR），结果显示，60%和 20%的比例条件下，被试的 PR 存在显著差异，且不存在天花板效应与地板效应，因此适合作为实验二中散点群整体运动的高、低不确定性的相干点比例。”

意见 2:

建议作者将对统计功效和样本量的计算移入正文，而不是放在自检报告里。（为什么两个实验设置不同的 power？）

回应:

感谢审稿人的建议。我们将自检报告里对统计功效和样本量的放入了正文，一般研究 power 都选为 0.8,考虑到实验一是实验二选择参数的前提,因此实验一的 power 提高至 0.9。

意见 3:

“然而，当前刺激的不确定性与先前线索的预期有效性如何影响运动方向感知决策尚不清楚。“这里与上文的衔接出现了问题。

回应:

感谢审稿人的建议。修改稿中将这句话改为“运动方向的感知决策既可以通过来自预期的先验信息的调节，也受到感觉信息的不确定性的影响。然而，不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的影响机制尚不清楚。”

意见 4:

“实验一考察了不同比例的相干点的方向感知决策的表现。“不完整表述

回应:

修改稿中更正为“实验一考察了被试在不同相干点比例下完成方向感知决策任务的表现”

意见 5:

实验一名称建议：刺激的不确定性对 xxx 的影响；“相干点的比例”对 xxx 的影响虽然直接，和前文逻辑有点断。毕竟，相干点的比例只是不确定性的指标

回应:

感谢审稿人的建议。修改稿中将实验一名称改为“刺激不确定性对运动方向感知决策

的影响”。

意见 6:

建议图 1 的目标刺激图将点作为主体，箭头颜色淡点说明点的运动方向。目前的图看起来并没有点，只有箭头，而实际的实验中并没有箭头存在。（实验 2 中的图看起来好点）

回应:

感谢审稿人的建议，修改稿中将箭头颜色变淡，突出了白色相干点。

意见 7:

为什么线索运动的有效性要用 10% 和 90% 表达？由于有效的线索也是有偏差的（22.5 度以内），这种设置有模糊性。按我的理解，直接用提示方向和实际方向的夹角作为连续指标应该比仅设置两种离散的有效性水平更能说明问题，只不过分析数据更复杂点儿。

回应:

感谢审稿人的意见。线索运动有效性的设置是希望设置高有效性和低有效性两种水平，并且关注预期有效性和不确定性的关系。采用 10% 与 90% 的有效性比例参考了前人研究（Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013）。此外，由于预期有效性是关联性学习的产物，需要使颜色线索与有效性关联起来，如果有效性水平过多，则需要设置较多的颜色，不利于关联学习的形成。因此，本研究没有采用连续指标作为有效性的水平。

此外，有效性线索存在偏差（22.5 度内）的目的是为了避免被试的练习效应。由于相干点的运动方向只有 8 种，如果线索提示没有偏差（0 度），高有效性的箭头线索只会出现在 8 个固定位置上，那么被试将很快学会 8 种固定的方向，这会对因变量的测量产生较大的干扰，测试的结果会受到练习效应较大的影响。因此，有效性线索的偏差能够使测量的感知准确度排除练习和猜测效应，更加真实准确。

为了解释说明上述原因，在修改稿的引言部分增加“为了避免线索只提示固定的方向造成的练习效应，将预期有效性定义为线索正确预测相干点方向的比例”，在方法部分增加了“两种预测有效性的比例设置参考了前人研究（Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013）”。

审稿人 3 意见:

作者已经根据审稿意见做了详细的修改和补充说明，建议根据学报的发表格式等要求修后发表。

回应:

感谢审稿人的意见，我们根据学报的官网上有关发表格式的文件对文章做出了仔细的修改。

第三轮

编委意见:

该论文经过两轮修改后，较好地回答了审稿人提出的问题，论文质量有了较大的提升，行为简洁，逻辑性较强，两个研究层层递进，建议接收论文。但在接收之前，建议作者做出如下修改。

意见 1:

本研究是一个行为研究，却在前言和讨论引用脑成像的证据来支持，不太妥当。

回应：

感谢编委的意见。根据编委意见，对前言与讨论部分脑成像的研究进行了弱化处理，具体如下：

前言部分脑成像证据主要在第四段，该段落分为两个部分，分别为“两种加工模式彼此独立”和“两种加工模式彼此协同”。关于彼此独立的论述部分，修改稿中增加了行为学证据“行为研究发现，当预期到工作记忆负载较低时，个体倾向于采用主动性控制策略，使用先前工作记忆中的内容为后续感知做准备；相反，当预期工作记忆负载较高时，个体则会利用即时信息进行处理（Speer et al., 2003）。”关于两种模式彼此协同的论述部分，修改稿中删减了脑成像的结果，并补充突出了本研究的意义和价值“这与 DMC 理论不同，表明两种加工模式可能涉及共同加工过程，进而协同工作。因此，同时考察不确定性与预期有效性的作用，在理论上能够探究反应性控制与主动性控制的关系，为完善 DMC 理论提供依据”。

此外，讨论部分的脑成像证据主要在讨论的第二段，主要是为不确定性和预期有效性有交互作用的结果的推论提供支持性证据，在本段最后对未来脑成像的研究提出了展望“预期有效性与不确定性的整合机制支持了主动性控制和反应性控制协同工作的假设（Wu et al., 2020），未来脑成像研究可以更加深入地探讨共同加工过程及其涉及的脑区”。

意见 2：

尽管审稿人之前提出的理论创新的问题，但作者并不是很好的解决了。建议作者进一步加强对理论的创新和贡献或者发展的论述，而不是简单地说研究结果支持某理论。

回应：

感谢编委的意见。本研究的理论创新处主要在于对双重控制机制（DMC）理论的贡献。以往研究多认为反应性控制与主动性控制彼此独立、相互取代，然而本研究的结果说明了两者的涉及到了共同的加工过程，且刺激不确定性和预期有效性其本质可能都是认知控制的表现。修改稿中，为了加强对理论价值的论述，我们在引言的第四段（1）补充了不确定性与预期有效性所属的加工模式“.....主动性控制发生在感知任务之前，通过持续保持任务目标以优化感知过程，从而促进被预期地刺激的加工；反应性控制则在刺激出现后根据任务需要进行即时的处理，从而激活目标信息加工流程。刺激的不确定性能够改变信息的信噪比，从而影响感知决策，属于反应性控制。线索预期有效性出现在刺激之前，并被保持在工作记忆中，根据任务目标来影响感知决策，属于主动性控制”。（2）明确现有研究结果与以往理论假设之间的矛盾。（3）说明本研究的理论价值，即通过探讨不确定性与预期有效性的关系，从而探讨反应性控制与主动性控制的关系，进而为探究理论与实证的不一致做出实证回答“因此，同时考察不确定性与预期有效性的作用，在理论上能够探究反应性控制与主动性控制的关系，为完善 DMC 理论提供依据”。

此外，在讨论部分，强调了本研究的理论意义：“研究发现，预期效应随不确定性增加而提高。个体对预期有效性的利用受不确定性调节，说明感觉信息和先验信息能够在运动方向感知决策中彼此整合，该结果对 DMC 理论进行了修正，表明主动性控制与反应性控制涉及相同加工过程，彼此协同工作。该同一认知过程可能是认知控制（cognitive control）过程，认知控制是高级认知加工的核心功能，它能够在不确定的环境中协调心理操作，选择并优先处理重要信息（Wu et al., 2020）。有研究认为较低的预期有效性会使线索正确预测目标的概率变低，个体会面临因线索失效而导致的不确定（Mushtaq et al., 2011; Yu & Dayan, 2005）。因此，“不确定性”的认知加工不只是感觉信息引起的反应性控制，也可能是由预期有效性引起的主动性控制”。

主编意见：经审阅，[xb21-164]已经达到刊发水平。同意发表