

施动感研究的意向捆绑范式述评^{*}

马家俊 魏坤琳 陈立翰^{**}

(北京大学心理学系, 北京, 100871)

摘要 施动感是自我意识的一个重要部分。意向捆绑即人的动作及动作的感觉结果两者的时间点主观上被感知为相互靠近的现象, 为研究人类的施动感提供了一个重要的测量手段。本文综述意向捆绑的实验范式和认知机制, 发现目前线索整合理论能最好的解释意向捆绑现象。意向捆绑的范式可以用于临床疾病和跨文化的研究。今后还应深入研究意向捆绑机制及意向捆绑与施动感的关系。

关键词 施动感 意向捆绑 因果关系 预测推理和回顾推理 线索整合

1 引言

心理科学作为独立完整的实验科学, 脱胎于生理学与哲学。对于自我意识问题的考察, 是哲学、心理学、文学, 乃至人工智能领域的重要命题。自我意识 (self-consciousness) 是人区别于其他生物的重要特征, 在心理学研究中, 如何在实验室环境

下操作研究自我意识一直是研究难点。自我意识的一个重要部分是施动感 (sense of agency, 以下简称 SoA), 即个体主观意识到自己发出、执行并控制自身的动作影响外部世界 (Gallagher, 2000)。近二十年来, SoA 日益受到研究者的重视, 相关的文献出版量和引文数不断增加 (图 1)。

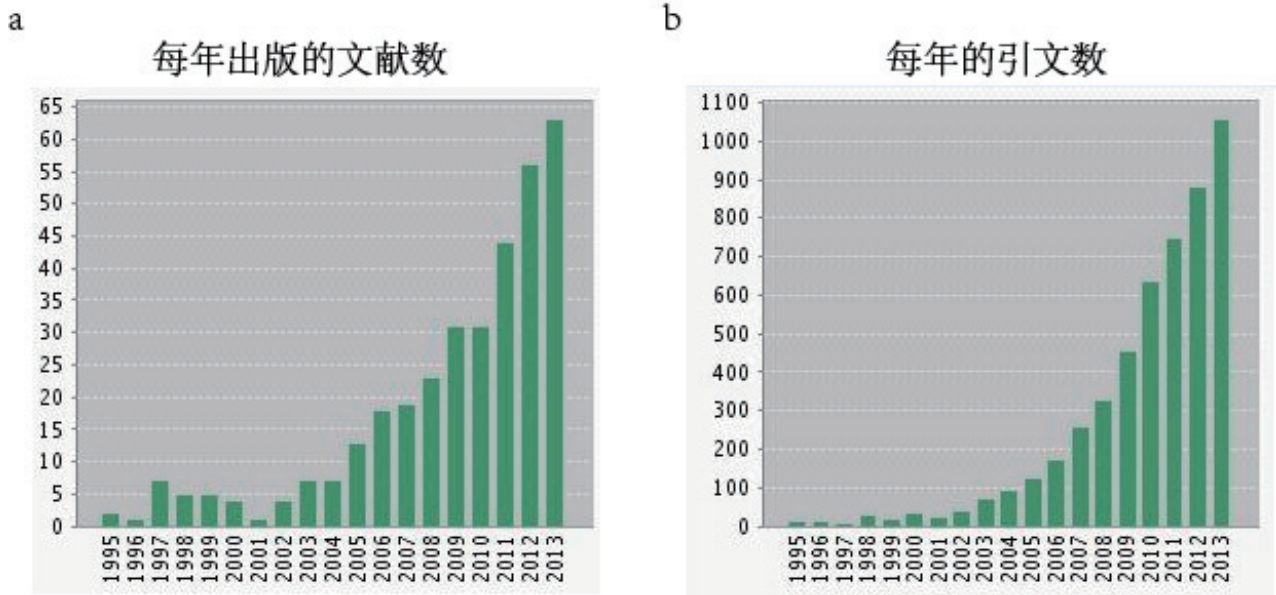


图 1 研究 SoA 的文献数量和引文数增长幅度 (来自 WEB OF SCIENCE 的引文分析报告)

在 SoA 的研究中, 一个重要的实验范式是意向捆绑 (intentional binding, 以下简称 IB), 指人的动作及动作的感觉结果两者的时间点主观上被感

知为相互靠近的现象 (Haggard, Clark, & Kalogeras, 2002)。IB 因只出现在自主动作情况下, 故成为量化 SoA 的重要手段, 但目前我们仍不清楚其机制。

^{*} 本研究得到国家自然科学基金青年基金项目 (31200760, 31000456) 的资助。

^{**} 通讯作者: 陈立翰。E-mail: CLH@pku.edu.cn

Moore 等人最近发表的一篇综述中, 提出了 SoA 研究的几个核心问题, 包括 SoA 的传统定义(控制行为以影响环境中的刺激事件), SoA 与注意、行为抑制的关系以及 SoA 在若干社会场景下的表达方式 (Moore & Obhi, 2012)。然而, 对于 IB 基于认知的“数量化”机制的考察, 比较匮乏。对 IB 机制的研究对于了解 SoA 有重要意义, 本文将介绍 IB 的实验范式并探讨 IB 的认知机制。早期研究认为 IB 是神经系统建立了自主动作 - 感觉结果之间的因果关系的结果 (Eagleman & Holcombe, 2002)。但通过总结相关研究, 我们发现从因果关系出发对 IB 的解释并不充分, 而线索整合理论能够给出更好的解释。

2 意向捆绑的实验范式

从测量时间知觉的方法出发, IB 的实验范式可以分为 Libet 钟表法和时距估测法。Libet 钟表法下, 被试判断时间的工具是 Libet 表, 被试的任务是报告发出动作或接受刺激时 Libet 表的表针转动到的位置。以 Haggard 等 (2002) 的实验为例 (图 2a), 实验分为基线条件 (含摁键条件和听觉刺激条件) 和操作条件。摁键条件下, 被试发出摁键动作, 报告发出动作的时间。听觉刺激条件下, 向被试呈现听觉刺激, 被试报告接受到听觉刺激的时间。操作条件下, 被试摁键后 250ms 呈现听觉刺激, 被试报告发出动作或者接受刺激时的时间。被试在操作条件下的错误减去基线条件下对应的错误, 即为时间感知的偏移 (shift)。在自主动作情况下, 自主动作的时间感知偏移为正, 听觉刺激的时间感知偏移为负, 但在被动动作情况下结果相反。因此, 自主动作 - 感觉结果在时间感知上相互靠近, 即产生意向“捆绑” (Haggard et al., 2002)。

有些研究者批评 Libet 钟表法对时距的测量不够直接且操作麻烦, 提议用时距估测法研究 IB, 被试直接报告动作 - 感觉结果的时距 (图 2b), 发现被试对自主动作 - 感觉结果的时距估测显著低于对非自主动作 - 感觉结果的时距估测 (Humphreys & Buehner, 2009)。时距估测法更直接且操作简单, 但不能单独测量动作或感觉结果的时间知觉, 因此更适用于只考察时距知觉的情形。

无论是 Libet 钟表法还是时距估测法, 早期研究均发现 IB 仅出现于自主动作的情况 (Haggard et al., 2002)。但最近研究发现在被动动作 (Strother, House, & Obhi, 2010)、观察他人动作 (Poonian &

Cunnington, 2013) 甚至机器动作 (Buehner, 2012) 的情况时, 也能出现 IB 现象。这说明 IB 的发生情况更加广泛, 也说明 IB 与 SoA 关系比较复杂。鉴于大部分研究仍基于 IB 只出现于自主动作的情况, 下文对 IB 的讨论针对“自主动作”的情况。

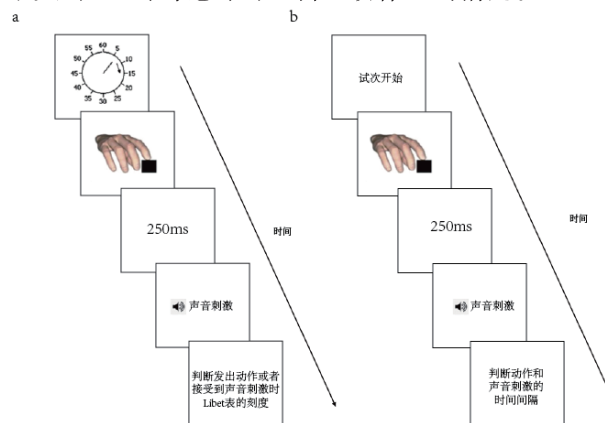


图 2 意向捆绑的主要实验范式

注: a: Libet 钟表法。操作条件下, 每个试次, Libet 表开始转动, 被试摁键 250ms 后呈现听觉刺激, 被试判断发出动作或者接收到听觉刺激时 Libet 表针位置。b: 时距估测法。被试摁键 250ms 后呈现听觉刺激, 被试判断动作和听觉刺激的时间间隔。

3 意向捆绑的认知机制

3.1 因果关系

早期研究认为 IB 是由于神经系统建立了自主动作 - 感觉结果之间的因果关系, 存在因果关系的动作 - 感觉结果在时间感知上相互靠近 (Eagleman & Holcombe, 2002)。因果关系的强度取决于动作 - 感觉结果的邻近性 (contiguity) 和相倚性 (contingency), 一些研究试图通过探讨这两者对 IB 的影响来支持因果关系对 IB 的解释。

邻近性取决于动作 - 感觉结果的时间间隔, 间隔越小邻近性越强。Libet 钟表法的研究发现 IB 出现的时距范围为 650ms 左右以内, 时距越大 IB 效应越小 (Haggard et al., 2002)。而时距估测法的研究发现时距较大时 (4s) 也会出现 IB, 且时距越大 IB 效应越强 (Humphreys & Buehner, 2009)。相倚性取决于动作 - 感觉结果同时出现的概率, 动作 - 感觉结果同时出现的概率越大, 相倚性越强。研究者通过控制感觉结果出现的概率研究相倚性的影响, 发现感觉结果出现概率越高, IB 效应越强 (Engbert & Wohlschläger, 2007)。在这些研究中, 对动作 - 感觉结果关系的学习扮演了重要角色。但最近一项研究发现被试对时距知觉的先验偏差 (prior bias) 比学习过程对 IB 的影响更大 (Cravo, Haddad,

Claessens, & Baldo, 2013)。以上研究可以看出, 邻近性和相倚性对因果关系的影响和对 IB 的影响并不一致, 此外先验偏差对 IB 也有影响, 因此因果关系对 IB 的解释并不充分。

3.2 预测推理和回顾推理

另外一些研究者试图通过回答神经系统如何建立自主动作 - 感觉结果的因果关系来探讨 IB 的认知机制。对于这个问题存在“预测推理”和“回顾推理”的争论。预测推理的观点认为神经系统预测自主动作的感觉结果, 预测结果与实际结果一致即认为感觉结果由动作引起 (Wolpert & Ghahramani, 2000)。回顾推理的观点认为神经系统根据感觉结果推断其来源并建立因果关系 (Wegner & Wheatley, 1999)。

研究发现两种推理对 IB 均有贡献。Moore 和 Haggard (2008) 的研究分离了 IB 中对动作的时间感知的预测推理成分和回顾推理成分 (Moore & Haggard, 2008)。这项研究操纵了被试发出动作后感觉结果出现的概率 (75% 和 50%)。75% 概率条件下, 感觉结果的可预测性较高。50% 概率条件下, 感觉结果出现与不出现的概率相同, 可预测性最低。根据感觉结果是否出现, 两种条件下的试次分为“动作 - 感觉结果”和“只有动作”两种。对于“只有动作”类型的试次, 75% 概率条件和 50% 概率条件的差异只有感觉结果的可预测性, 研究结果中两者的显著差异支持了预测推理的作用。在 50% 概率条件下, “动作 - 感觉结果”和“只有动作”两种试次的差异在于是否有感觉结果, 研究结果中这两者的显著差异支持了回顾推理的作用。但是, 这项研究没有解释对感觉结果的时间感知, 也没有回答两种推理如何共同作用。

3.3 线索整合理论

从上面列举的证据来看, 基于因果关系对 IB 的解释不完善也不够直接。有研究者提出用线索整合 (cue integration) 理论解释 IB (Moore, Wegner, & Haggard, 2009)。线索整合理论认为神经系统最终的感知估计是对各种不确定性信息 (即线索) 整合的结果, 每种线索对最终估计的影响跟其可靠性有关, 可靠性越大 (即不确定性越小), 对最终估计的权重越大 (Ernst & Bulthoff, 2004)。

根据线索整合理论, IB 中对动作和感觉结果的时间感知, 均是动作线索和感觉结果线索整合的结果。线索整合的过程符合贝叶斯推理 (Ernst &

Bulthoff, 2004), 以对动作的时间感知为例, $t = \omega_{动作} \times t_{动作} + \omega_{感觉结果} \times t_{感觉结果}$, 其中 t 是对动作的时间估计, $\omega_{动作}$ 和 $\omega_{感觉结果}$ 分别是两种线索的权重 (两者之和为 1), $t_{动作}$ 和 $t_{感觉结果}$ 分别是对两种线索的时间估计。因此 t 在 $t_{动作}$ 和 $t_{感觉结果}$ 之间, 这解释了动作的时间感知正偏移。此外, 动作线索对应的可靠性越大, $\omega_{动作}$ 越大, $\omega_{感觉结果}$ 越小, t 会与 $t_{动作}$ 更靠近, 动作的时间感知偏移就会越小。同样的, 对感觉结果的时间感知也会有类似的解释。

最近一项研究发现, 感觉结果线索的可靠性越高, 动作的时间感知偏移就越大 (Wolpe, Haggard, Siebner, & Rowe, 2013), 支持了线索整合理论对 IB 中动作的时间感知的解释。但这项研究没有发现感觉结果线索的可靠性对感觉结果的时间感知的影响, 可能是选取的感觉刺激过于简单 (即天花板效应) 的原因, 该研究也没有量化线索的可靠性。

4 总结与展望

自 IB 现象发现十多年来, 其实验范式已广泛用于对 SoA 的研究。同时, 意向捆绑的实验范式强调动作与感觉反馈之间的“绑定”, 对研究多感觉通道的时间知觉提供了很好的实验范式和应用基础。此外, IB 范式可以用于研究一些临床疾病, 比如在区分自我与外部世界方面有损伤的阳性症状精神分裂症病人 (Voss et al., 2010), 社交功能有障碍的自闭症病人 (Sperduti, Pieron, Leboyer, & Zalla, 2013)。由于受到后天教育和环境的影响, 不同的文化中的 SoA 也可能不同, 未来的研究可以从 IB 的跨文化角度出发, 探索不同文化下 SoA 的异同。

目前看来, 线索整合理论对 IB 的解释最充分, 但还需要更多证据支持, 特别是感觉结果的时间感知偏移方面的证据。未来研究可以通过操纵线索可靠性考察动作和感觉结果时间感知偏移的变化, 并建立相应的数学模型, 进一步支持线索整合理论。IB 研究的另外一个挑战是对其神经机制的理解, 一些研究发现辅助运动区 (Kühn, Brass, & Haggard, 2012; Moore, Ruge, Wenke, Rothwell, & Haggard, 2010) 与 IB 有密切关系。此外, 在观看他人动作时, 前脑岛、后脑岛、上顶叶、初级运动皮层都有激活 (Moore, Teufel, Subramaniam, Davis, & Fletcher, 2013)。这说明 IB 可能有一个广泛的神经网络基础。

虽然 IB 作为量化 SoA 的工具已经广泛使用, 但其与 SoA 的关系还需进一步阐明。首先, 对于

SoA 概念的内部构建, 不同的观察角度得到了不同的成分范畴。Gallagher 最近的一篇综述性文章, 总结并提出了施动 (agency) 现象的三个成分 (未来导向的意向、基于现在的意向与基于运动的意向); 从归因加工的水平来看, SoA 可包括内隐的前反思 (pre-reflective) 层面和外显的反思 (reflective) 层面, 其中, 内隐的反思层面又可细分为冲动 (urge) 与效应 (effect) 两个成分, 前者对应于运动控制、后者对应于对自己动作的监测 (Gallagher, 2012)。另外, SoA 与所有权感 (sense of ownership, SO) 之间存在联系与区别。有研究发现在两人以上联合动作 (joint action) 完成 IB 任务的情形下, 即动作的发出存在主动者和跟从者的场合, 两者的 IB 效应没有显著差异 (Obhi & Hall, 2011)。此时主动者和跟从者会形成一个整体的“我们”的施动者, 取代了“我”作为施动者。对于跟从者来说, 即使 SoA 缺失, SO 仍然保留。因此, 未来研究要阐明 IB 和 SoA 在不同实验情境下的关系, 也要区分 SoA 与 SO 在完成特定知觉与认知任务上的贡献。此外, 传统观点认为意向与动作是序列加工, 即意向引起随后的动作, 但最近一些研究提出质疑, 认为意向和动作的发生可能是同时的 (Uithol, Burnston, & Haselager, 2014)。如果这种观点成立, 传统的 SoA 和 IB 的概念和内涵都需要修正。

参考文献

- Buehner, M. J. (2012). Understanding the past, predicting the future causation, not intentional action, is the root of temporal binding. *Psychological Science, 23*(12), 1490–1497.
- Cravo, A. M., Haddad, H., Claessens, P. M. E., & Baldo, M. V. C. (2013). Bias and learning in temporal binding: Intervals between actions and outcomes are compressed by prior bias. *Consciousness and Cognition, 22*(4), 1174–1180.
- Eagleman, D. M., & Holcombe, A. O. (2002). Causality and the perception of time. *Trends in Cognitive Sciences, 6*(8), 323–325.
- Engbert, K., & Wohlschläger, A. (2007). Intentions and expectations in temporal binding. *Consciousness and Cognition, 16*(2), 255–264.
- Ernst, M. O., & Bulthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences, 8*(4), 162–169.
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences, 4*(1), 14–21.
- Gallagher, S. (2012). Multiple aspects in the sense of agency. *New Ideas in Psychology, 30*(1), 15–31.
- Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience, 5*(4), 382–385.
- Humphreys, G. R., & Buehner, M. J. (2009). Magnitude estimation reveals temporal binding at super-second intervals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35*(5), 1542–1542.
- Kühn, S., Brass, M., & Haggard, P. (2012). Feeling in control: Neural correlates of experience of agency. *Cortex, 49*(7), 1935–1942.
- Moore, J., & Haggard, P. (2008). Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and Cognition, 17*(1), 136–144.
- Moore, J. W., & Obhi, S. S. (2012). Intentional binding and the sense of agency: A review. *Consciousness and Cognition, 21*(1), 546–561.
- Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and Cognition, 18*(4), 1056–1064.
- Moore, J. W., Ruge, D., Wenke, D., Rothwell, J., & Haggard, P. (2010). Disrupting the experience of control in the human brain: Pre-supplementary motor area contributes to the sense of agency. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 277*(1693), 2503–2509.
- Obhi, S. S., & Hall, P. (2011). Sense of agency and intentional binding in joint action. *Experimental Brain Research, 211*(3–4), 655–662.
- Poonian, S. K., & Cunnington, R. (2013). Intentional binding in self-made and observed actions. *Experimental Brain Research, 229*(3), 419–427.
- Sperduti, M., Pieron, M., Leboyer, M., & Zalla, T. (2013). Altered pre-reflective sense of agency in Autism Spectrum Disorders as revealed by reduced intentional binding. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 44*(2), 343–352.
- Strother, L., House, K. A., & Obhi, S. S. (2010). Subjective agency and awareness of shared actions. *Consciousness and Cognition, 19*(1), 12–20.
- Uithol, S., Burnston, D. C., & Haselager, P. (2014). Why we may not find intentions in the brain. *Neuropsychologia, 56*, 129–139.
- Voss, M., Moore, J., Hauser, M., Gallinat, J., Heinz, A., & Haggard, P. (2010). Altered awareness of action in schizophrenia: A specific deficit in predicting action consequences. *Brain, 133*(10), 3104–3112.
- Wegner, D. M., & Wheatley, T. (1999). Apparent mental causation: Sources of the experience of will. *American Psychologist, 54*(7), 480–492.
- Wolpe, N., Haggard, P., Siebner, H. R., & Rowe, J. B. (2013). Cue integration and the perception of action in intentional binding. *Experimental Brain Research, 229*(3), 467–474.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience, 3*, 1212–1217.

A Review of Intentional Binding Paradigm for Sense of Agency Research

Ma Jiajun, Wei Kunlin, Chen Lihan

(Department of Psychology, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract Human agency manifests itself as influencing the external world through its own actions. Measuring sense of agency (SoA) is a challenge for research of human agency. Haggard et al. (2002) found that there is a temporal attraction between voluntary action and its sensory consequence. This so-called “intentional binding” (IB) has served as an important tool for quantifying SoA. This paper reviews its research paradigms and cognitive mechanism.

In studies of IB, there are two main experimental methods -- Libet’s clock method and the interval estimation method. Libet’s clock method measures the timing perception of action and sensory consequence separately when participants report their timing judgment with the aid of viewing a fast-rotating clock. The interval estimation method directly records the subject-reported interval between action and sensory consequence. Some researchers proposed that to use cognitive process to account for IB, it has to answer how the CNS establishes causality between voluntary action and sensory consequence. There were two different theories – the predictive inference theory and the retrospective inference theory. Predictive inference theory assumes that the CNS predicts the sensory consequence of action and establishes causality if the prediction matches the actual consequence. The retrospective inference theory argues that the CNS infers the causality after it receives the sensory feedback. Researchers found that both of them contributed to the timing perception of action in IB. However, there is no evidence for the timing perception of sensory consequence in IB and the details of their joint contribution are not clear. According to the cue integration theory, the timing shift is a result of integration of the action cue and the sensory consequence cue. Final readout of the CNS is based on weighted integration of cues where the weight of each cue is inversely related to its reliability. The more reliable the cue is, the more weight it has. Thus, this theory can explain the timing shifts of both events.

The paradigm of IB has been extensively used in exploring SoA which plays an important role in self-consciousness and social interaction. Future research can use IB to explore the SoA in social condition, some diseases deficit in SoA and the culture differences of SoA. Though the cue integration theory can explain IB better, the evidence is not strong enough, especially for the timing perception of sensory consequence. Future studies are warranted to test cue integration and build quantitative models. At present, neural mechanisms underlying IB are poorly understood. Available studies suggest that supplementary motor area is related to IB but a broad network of neural substrates subserve IB. In addition, it is necessary to refine our understanding of the relation between IB and agency.

Key words sense of agency, intentional binding, causality, predictive inference and retrospective inference, cue integration