

动作对时间加工的影响研究综述

郑晨豪^{*#}, 王悦^{*}, 刘佳冰, 吕佳丽, 刘锦妍

山东师范大学心理学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年5月25日; 录用日期: 2024年7月12日; 发布日期: 2024年7月19日

摘要

时间是人们理解世界的重要维度, 对时间信息的准确加工是正确认知、适应外界的必要条件。越来越多的证据表明, 时间加工不仅可以指导个体更好地发出动作指令(例如演奏乐器), 动作本身也可以影响个体对时间信息的加工: 动作既可以使时间加工更加精确, 也可以对其产生调制作用。近年, 一些脑科学研究显示, 与运动相关的脑区可能构成了计时行为神经网络的核心成分, 进一步说明了动作系统与时间加工系统之间的紧密联系。本文旨在梳理相关文献, 深入探讨动作对时间加工的影响及其潜在的机制。

关键词

时间加工, 时间知觉, 感觉运动计时

A Review of the Effects of Motor on Temporal Processing

Chenhao Zheng^{*#}, Yue Wang^{*}, Jiabing Liu, Jiali Lyu, Jinyan Liu

Department of Psychology, Shandong Normal University, Jinan Shandong

Received: May 25th, 2024; accepted: Jul. 12th, 2024; published: Jul. 19th, 2024

Abstract

Time serves as a critical dimension for human understanding of the world, with accurate processing of temporal information being a necessary condition for proper cognition and adaptation to the environment. Increasing evidence suggests that temporal processing not only guides individuals in issuing motor commands more effectively (e.g., playing a musical instrument), but the actions themselves can also influence the processing of temporal information: actions can both enhance the precision of temporal processing and modulate it. In recent years, neuroscience re-

^{*}共同第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 郑晨豪, 王悦, 刘佳冰, 吕佳丽, 刘锦妍(2024). 动作对时间加工的影响研究综述. 心理学进展, 14(7), 407-413. DOI: 10.12677/ap.2024.147495

search has shown that brain regions associated with motor functions may constitute core components of the neural network underlying timing behaviors, further illustrating the close relationship between the motor system and the temporal processing system. This paper aims to review relevant literature and delve into the effects of motor on temporal processing, as well as its potential mechanisms.

Keywords

Temporal Processing, Temporal Perception, Sensorimotor Timing

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

时间加工(temporal processing)是众多动作任务的基础,它既包括了对时间间隔、时程、时序的估计等知觉加工过程,也包括时间注意、记忆等高级加工过程(Iversen & Balasubramaniam, 2016; Mauk & Buonomano, 2004)。为适应瞬息万变的世界,人们需要对不断动态变化的外界感知觉输入与自身动作输出进行精确的时间加工(De Kock et al., 2021a)。这一过程的基础是感知觉系统与运动系统的连结与整合,即感觉-运动耦合(sensory-motor coupling)与知觉运动耦合(perception-motor coupling),它们是连结感/知觉系统与运动系统的双向回路(Prinz, 1997)。动作受到时间加工的调控:例如在钢琴演奏中,音乐家对音符时程的感知觉引导其按键动作,而按键动作产生的听觉效果与预期的相符程度将被用于矫正下一动作的执行(Novembre & Keller, 2014);另一方面,感知觉的形成离不开运动的辅助:神经生物学界认为,生物在对外界环境进行主动感知(active sensing)的过程包含了两个主要过程:1)通过感觉器官获取信息,对世界进行推断和知觉;2)通过运动改变采样模式,主动获取有效信息,这既包括控制感官器官的朝向,也包括与外界发生动作交互,如同步动作等(Morillon et al., 2014; Yang et al., 2016)。因此,运动与时间加工的相互作用在人类的各种认知和行为中扮演了重要的角色。本文将聚焦于动作对时间加工的增益效应与调制效应展开探讨。

2. 动作对时间加工的增益效应

已有一系列研究表明,动作可使时间加工更加精确。例如, Su & Pöppel (2011)要求被试听一段非等时声音序列,并从中提取序列节拍(节拍提取, pulse extraction),随后进行拍子同步按键(节拍生成, pulse production),结果发现,在节拍提取阶段被要求进行偏好动作(如用脚打节拍、点头)的被试组在节拍生成阶段的表现显著好于节拍提取阶段进行静听的被试组。这表明动作促进了被试对声音序列的潜在时间结构(节奏)的加工与提取(Su & Pöppel, 2011)。Iordanescu 等人(2012)则采用时间二分范式,要求被试判断依次呈现的三个声音刺激中,第二个声音刺激早于/晚于第一个声音和第三个声音呈现的中间时刻,结果发现对试次的启动动作(按键开始)可以使被试对时间间隔的感知比被动的固定开始更精确,即动作增强了时间加工的敏感性。Wiener et al. (2019)的研究同样发现,在时间再现任务(time reproduction task)中,与保持静止相比,被试在听声音刺激的同时进行自由运动后所再现的时间间隔更精确,表明动作能够提高被试时间知觉的精确性与动作决策质量。

Manning 等人使用计时辨别范式系统研究了同步动作对时间知觉的增益效应。他们要求被试听一段

等时声音序列, 并判断最后一个声音刺激是否出现在落在序列拍子周期呈现的预期时刻上, 当声音刺激出现时刻晚于预期时刻时, 被试在同步动作条件下的表现显著好于非同步动作条件(Manning & Schutz, 2013), 这一效应在消除了同步按键动作产生的声音反馈时依然存在(Manning & Schutz, 2015a, 2015b), 并且其效应大小受到被试的音乐训练与动作效应器的影响(Manning et al., 2016; Manning et al., 2020)。这说明同步动作的参与提高了个体的计时能力。动作对于儿童时间加工的发展同样具有增益效应。Monier 等人发现, 在对计时行为的系统学习中, 感觉运动学习相较于无运动的视觉学习显著提升了随后的计时任务表现, 这一效应在幼年的儿童(5 岁组)中尤为明显, 这表明动作帮助儿童构建了稳定且灵活的事件表征, 促进了动作和时间的感觉运动耦合编码(Monier et al., 2019)。

动态注意理论(dynamic attending theory, DAT)认为, 在时间维度上, 注意资源并非平均分布而是以振荡的形式动态展开, 表现为注意的周期性波动, 这一波动具有以下三个特性: (1) 内源性(endogenous), 无外界节奏刺激诱导时, 注意以其固有频率振荡; (2) 夹带(entrainment), 有外界节奏刺激诱导时, 注意通过夹带调整其振荡的频率和相位, 从而实现与外界节奏刺激的时间同步; (3) 自维持(self-sustaining), 外界节奏刺激停止后, 注意振荡回归其固有频率(Jones et al., 2002; Large & Jones, 1999)。因此, 当外界声音刺激的时间结构为等时拍子时, 注意会调整振荡形式与其实现时间同步, 表现为注意在拍子点前逐渐上升, 在拍子点时达到峰值, 在拍子点后迅速下降, 从而分配较多注意资源至拍子点, 促进拍子点处的感知觉加工(Jones et al., 2002)。Morillon 等人(2014)则开创性地借助基于音高判断的时间注意范式证明了拍子同步对听觉时间注意的增益效应。该范式要求被试凭借参考音所提供的拍子周期, 从干扰音背景中分离出拍子点上的目标音, 并判断目标音的平均音高, 由于被试只能依靠参考音所提供的拍子周期分离目标音, 故该范式可用于研究听觉拍子时间注意。实验结果表明, 被试拍子同步条件下任务正确率显著高于静听条件, 拍子同步提高了被试对目标音的感觉增益(sensory gain)而降低了对干扰音的感觉增益, 即拍子同步提高了被试听觉时间注意精度, 产生了增益效应。基于动态注意理论, 这可解释为同步动作与个体对听觉拍子时间注意的周期性震荡一致, 从而改善了时间注意的精确性, 使得被试基于任务特征的知觉辨别任务更准确。同样有研究发现, 跟随言语节奏的同步动作可以通过提升时间预期产生对言语信息加工的增益效应(Falk et al., 2017; Falk & Dalla Bella, 2016)。

值得注意的是, 动作对时间加工的增益效应存在视听通道差异。与听觉通道相比, 视觉通道中相关的研究较少。Iordanescu 等人(2012)所发现的动作对时间加工的敏感性增益仅存在于听觉通道; Zalta 等人(2020)对比了同步动作影响视觉闪烁与听觉短音时间注意的差异。发现对于听觉短音刺激, 个体在大约 1.7 Hz 的时候有着最佳的拍子同步稳定性表现, 当声音序列呈现的周期频率逐渐偏离 1.7 Hz 时, 被试感觉运动的一致性就会逐渐变差。因此拍子同步对听觉时间注意的增益效应存在一个最佳频率窗口, 当刺激呈现的拍子频率在 1.3 Hz~2.2 Hz 范围内时, 同步动作显著提升听觉时间注意表现; 而在视觉通道中, Nani 等人(2019)采用相同的范式发现个体对视觉闪烁刺激最佳采样速率约为 0.7 Hz, 当闪烁刺激呈现周期为 1 Hz~3.8 Hz 时, 被试无法准确跟踪节拍, 同步动作会显著降低被试时间注意任务的正确率。因此, 同步动作对时间注意的影响似乎取决于同步动作和注意振荡之间在时间维度上的一致性。

在神经机制方面, Morillon & Baillet (2017)发现, 个体对听觉刺激的时间预期通过 δ 和 β 神经振荡编码, 而这些振荡正起源于左侧运动皮层, 指向听觉皮层, 表明运动皮层承担了向感觉皮层提供背景时间信息的关键作用(Morillon & Baillet, 2017)。其他神经影像学的研究也表明运动系统与计时系统在多层级神经网络中联结紧密(Merchant & Yarrow, 2016)。Nani 等人(2019)元分析研究发现, 计时加工依赖于一些传统上被认为是负责运动控制的脑区: 在计时任务中, 与非运动区域相比, 运动区被激活的可能性更大; 即使将涉及动作计时的任务排除在外, 相比非运动区域, 运动区的显著激活的比例更高, 平均激活似然估计值(activation likelihood estimation, ALE)更大(Nani et al., 2019)。Protopapa 等人(2019)的核磁研究发现,

处于前运动皮层内侧的辅助运动区(supplementary motor area, SMA)会对不同大小的时距产生不同的偏好反应。在皮层空间上相邻 SMA 区域偏好大小相似的时距反应, 同时 SMA 区域对所偏好大小以及相邻大小时距的反应更大, 并且会抑制对距离偏好大小较远的时距反应。在 SMA 不同区域上对时距选择反应的空间安排可能是一种表征时间流逝的重要机制。这表明 SMA 不仅是负责运动准备的重要区域, 同时也是时间加工表征的重要脑区。此外, 皮层下的运动系统, 如基底神经节(basal ganglia, BG)及其相关脑区也在计时过程中起到重要作用(Avanzino et al., 2016)。涉及动作计时任务时, 如跟随拍子同步动作, 基底节及相关区域被认为在动作计划中充当了“内在时钟”的作用, 负责对节奏信息进行拍子组织。即使没有外显动作, 在拍子计时中, 基底节对拍子知觉的产生和维持仍起到重要作用: 节奏引起的拍子知觉越强, 基底节与辅助运动区的活动越强(Grahn & Brett, 2007); 与正常被试相比, 基底节病变的帕金森(Parkinson's disease)患者在知觉辨别任务中没有表现出基于拍子的增益效应(Grahn & Brett, 2009); 在强拍子知觉的条件下, 基底节的壳核与听觉皮层、辅助运动区以及前运动区的功能连接更强, 这提示了基底节可能在感觉输入与运动计时系统中起到关键的中继作用(Grahn & Brett, 2009)。一些研究还发现运动皮层的受损会导致的时间上的认知障碍, 这也间接证明了运动系统与计时系统在神经机制上的重合(Avanzino et al., 2016)。例如, 帕金森患者由于中额叶认知控制过程受损导致其估计时距的变异性显著高于正常个体(Singh et al., 2021)。亨廷顿舞蹈症(Huntington's disease)患者表现出类似的时间缺陷, 在辨别时间结构规律性任务中的表现显著差于普通个体(Cope et al., 2014)。这些证据均证明了运动系统与计时系统联结紧密, 为动作对时间加工的增益效应提供了神经层面的证据支持。

3. 动作对时间加工的调制效应

动作对时间加工的作用不仅体现在增益效应上, 动作也可以对时间加工产生调制效应, 即不同动作可对个体的主观时间感知造成不同程度的影响。

早期研究发现, 快速眼动可以引起视觉主观感知时间的延长, 即时停错觉(Chronostasis) (Yarrow et al., 2001)。也有研究者发现自主动作和感觉序列在时间维度上的距离会被“挤压”地更加靠近(Haggard et al., 2002; Wenke & Haggard, 2009)。动作可影响个体的节奏知觉, 研究者要求被试听一段听觉复杂节奏序列, 观察被试倾向于在哪一拍上进行同步动作, 随后再给他们听带有重音的相同序列, 发现被试更倾向于听重音位置与同步动作位置相同的序列, 这表明动作影响了个体对节奏的表征, 这一发现在婴儿与成年人群中均存在(Phillips-Silver & Trainor, 2005, 2007)。

研究者们在上文所述的早期研究基础上进行了更深入的研究。Press 等人(2014)使用触觉、视觉刺激构造时程判断任务, 结果发现当目标刺激与运动相匹配时, 被试的主观感知时间显著变长, 且这一现象在动作准备阶段就已存在, 这一效应同样发生在触觉、视觉刺激与动作同时发生时(Press et al., 2014; Tomassini et al., 2014); 然而, 当动作发生在触觉、视觉刺激间的间隔时间时, 被试对该间隔时间的主观感知则显著变短(Sugano et al., 2014; Terao et al., 2008)。与 Haggard 等人的早期研究相似, 有研究者发现动作与其所触发延迟响应的感觉输入间的主观时间间隔被压缩(Knöll et al., 2013; Yabe & Goodale, 2015), 这被称为有意捆绑错觉(intentional binding illusion)。近期有研究认为, 这些现象似乎是基于同一种潜在机制, 即对不同的感觉与运动表征的结合, 并且这些表征可通过贝叶斯计算建模的方式实现最优结合(Legaspi & Toyozumi, 2019; Suzuki et al., 2019; Yamamoto, 2020)。

动作的时空特征也能调制个体的时间加工。Yon 等人(2017)的研究发现, 当被试在进行时间更长、速度更快、距离越远的手指敲击时, 所感知到的听觉刺激时程会更长。类似地, Yokosaka 等人(2015)发现, 更快的手部画圈动作会导致被试对视觉刺激的主观感知时程缩短。Tomassini 和 Morrone (2016)进一步发现, 对视觉刺激的计时取决于运动方向, 当手指向远离身体的方向时, 视觉主观感知时间会延长, 而当

手指向靠近身体的方向时, 视觉主观感知时间会缩短。Kock 等人(2021b)要求在被试操纵机器手臂进行计时任务, 发现增加机器手柄的阻力会导致更短的运动路径与更短的时间估计, 计算建模结果进一步表明, 这一时间压缩效应发生在感知层面。

此外, 一系列研究证明了动作系统对视听觉时间加工的深层次影响。有研究表明, 人类行为的运动表征影响了对视觉运动的时间知觉, 视觉运动的计时机制运用了一种由人类行为的运动知识调节的时间视觉运动表征(Gavazzi et al., 2013), 手部的动作可以影响人们对于视觉运动的时空信息预测(Li et al., 2023)。Benedetto 和 Baud-Bovy (2021)在节奏再现任务中发现动作的力度参与编码了节奏知觉的结构组织, 研究者认为这反映了运动和感觉系统之间存在一种共同的节奏表征, 即存在感觉运动回路中相互共享的时间超模态表征, 这能够促进对时间序列的感知和再现。而在神经机制方面, Chemin 等人(2014)的研究要求被试在听一段听觉节奏序列后, 跟随其特定的节奏移动身体, 随后再次听这一段序列, 结果表明, 身体运动后, 大脑对节奏的反应在与被试运动相关的频率上显著增强, 这说明运动系统可以选择性地塑造听觉节奏的内部表征。Tomassini 等人(2014)则发现了周期性运动使 θ 频段的视觉对比灵敏度周期性振荡, 研究者认为这可能说明大脑神经振荡可能调制了早期动作规划和早期视觉时间加工之间的自动耦合。

4. 总结与展望

本文简要综述了动作对时间加工的增益效应与调制效应的相关研究, 这些研究证实了广泛种类的动作效应器(手、足、眼、躯干等)均可对多感官(视、听、触觉)的时间加工产生不同程度的影响, 支持了动作系统与时间加工系统间存在密切关系的观点。

值得注意的是, 在动作对时间加工的增益效应上, 研究者们认为该效应仅存在于听觉通道, 且在视觉通道的相关研究较少(Iordanescu et al., 2012; Zalta et al., 2020)。然而, 研究者们所使用的视觉刺激形式为视觉闪烁(visual flash), 近年有研究表明, 这种离散刺激对于视觉拍子知觉与同步而言属于劣势刺激, 而连续的视觉运动刺激与其相比更具优势(Gan et al., 2015; Gu et al., 2019; Zhou et al., 2024)。因此, 未来的研究可聚焦于探索同步动作对于视觉运动刺激的增益效应。

此外, 本研究领域仍存在较多局限性, 例如现有研究仅探究了有限的运动种类(短暂、离散、弹震式动作)对于严密控制的计时任务的影响, 尚未在更具生态效度的场景下系统研究动作在日常生活中的时间加工的作用(De Kock et al., 2021a)。未来的研究可进一步丰富相关空缺, 帮助我们全面理解动作系统与时间加工系统间的关系及其潜在机制。

基金项目

国家级大学生创新训练项目(项目编号: 202310445222)。

参考文献

- Avanzino, L., Pelosin, E., Vicario, C. M., Lagravinese, G., Abbruzzese, G., & Martino, D. (2016). Time Processing and Motor Control in Movement Disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, Article 631. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00631>
- Benedetto, A., & Baud-Bovy, G. (2021). Tapping Force Encodes Metrical Aspects of Rhythm. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, Article 633956. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.633956>
- Chemin, B., Mouraux, A., & Nozaradan, S. (2014). Body Movement Selectively Shapes the Neural Representation of Musical Rhythms. *Psychological Science*, 25, 2147-2159. <https://doi.org/10.1177/0956797614551161>
- Cope, T. E., Grube, M., Singh, B., Burn, D. J., & Griffiths, T. D. (2014). The Basal Ganglia in Perceptual Timing: Timing Performance in Multiple System Atrophy and Huntington's Disease. *Neuropsychologia*, 52, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.09.039>
- De Kock, R., Gladhill, K. A., Ali, M. N., Joiner, W. M., & Wiener, M. (2021a). How Movements Shape the Perception of

- Time. *Trends in Cognitive Sciences*, 25, 950-963. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.08.002>
- De Kock, R., Zhou, W., Joiner, W. M., & Wiener, M. (2021b). Slowing the Body Slows down Time Perception. *eLife*, 10, e63607. <https://doi.org/10.7554/elife.63607>
- Falk, S., & Dalla Bella, S. (2016). It Is Better When Expected: Aligning Speech and Motor Rhythms Enhances Verbal Processing. *Language, Cognition and Neuroscience*, 31, 699-708. <https://doi.org/10.1080/23273798.2016.1144892>
- Falk, S., Volpi-Moncorger, C., & Dalla Bella, S. (2017). Auditory-Motor Rhythms and Speech Processing in French and German Listeners. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 395. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00395>
- Gan, L., Huang, Y., Zhou, L., Qian, C., & Wu, X. (2015). Synchronization to a Bouncing Ball with a Realistic Motion Trajectory. *Scientific Reports*, 5, Article No. 11974. <https://doi.org/10.1038/srep11974>
- Gavazzi, G., Bisio, A., & Pozzo, T. (2013). Time Perception of Visual Motion Is Tuned by the Motor Representation of Human Actions. *Scientific Reports*, 3, Article No. 1168. <https://doi.org/10.1038/srep01168>
- Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and Beat Perception in Motor Areas of the Brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 893-906. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.5.893>
- Grahn, J. A., & Brett, M. (2009). Impairment of Beat-Based Rhythm Discrimination in Parkinson's Disease. *Cortex*, 45, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.01.005>
- Gu, L., Huang, Y., & Wu, X. (2019). Advantage of Audition over Vision in a Perceptual Timing Task but Not in a Sensorimotor Timing Task. *Psychological Research*, 84, 2046-2056. <https://doi.org/10.1007/s00426-019-01204-3>
- Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary Action and Conscious Awareness. *Nature Neuroscience*, 5, 382-385. <https://doi.org/10.1038/nn827>
- Iordanescu, L., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2012). Action Enhances Auditory but Not Visual Temporal Sensitivity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 108-114. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0330-y>
- Iversen, J. R., & Balasubramaniam, R. (2016). Synchronization and Temporal Processing. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.027>
- Jones, M. R., Moynihan, H., MacKenzie, N., & Puente, J. (2002). Temporal Aspects of Stimulus-Driven Attending in Dynamic Arrays. *Psychological Science*, 13, 313-319. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00458>
- Knöll, J., Morrone, M. C., & Bremmer, F. (2013). Spatio-Temporal Topography of Saccadic Overestimation of Time. *Vision Research*, 83, 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.02.013>
- Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The Dynamics of Attending: How People Track Time-Varying Events. *Psychological Review*, 106, 119-159. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.106.1.119>
- Legaspi, R., & Toyoizumi, T. (2019). A Bayesian Psychophysics Model of Sense of Agency. *Nature Communications*, 10, Article No. 4250. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12170-0>
- Li, X., Baurès, R., & Cremoux, S. (2023). Hand Movements Influence the Perception of Time in a Prediction Motion Task. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 85, 1276-1286. <https://doi.org/10.3758/s13414-023-02690-9>
- Manning, F. C., & Schutz, M. (2015a). Movement Enhances Perceived Timing in the Absence of Auditory Feedback. *Timing & Time Perception*, 3, 3-12. <https://doi.org/10.1163/22134468-03002037>
- Manning, F. C., & Schutz, M. (2015b). Trained to Keep a Beat: Movement-Related Enhancements to Timing Perception in Percussionists and Non-Percussionists. *Psychological Research*, 80, 532-542. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0678-5>
- Manning, F. C., Harris, J., & Schutz, M. (2016). Temporal Prediction Abilities Are Mediated by Motor Effector and Rhythmic Expertise. *Experimental Brain Research*, 235, 861-871. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4845-8>
- Manning, F. C., Siminoski, A., & Schutz, M. (2020). Exploring the Effects of Effectors. *Music Perception*, 37, 196-207. <https://doi.org/10.1525/mp.2020.37.3.196>
- Manning, F., & Schutz, M. (2013). "Moving to the Beat" Improves Timing Perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 1133-1139. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0439-7>
- Mauk, M. D., & Buonomano, D. V. (2004). The Neural Basis of Temporal Processing. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 307-340. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144247>
- Merchant, H., & Yarrow, K. (2016). How the Motor System Both Encodes and Influences Our Sense of Time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.01.006>
- Monier, F., Droit-Volet, S., & Coull, J. T. (2019). The Beneficial Effect of Synchronized Action on Motor and Perceptual Timing in Children. *Developmental Science*, 22, e12821. <https://doi.org/10.1111/desc.12821>
- Morillon, B., & Baillet, S. (2017). Motor Origin of Temporal Predictions in Auditory Attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, E8913-E8921. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705373114>
- Morillon, B., Schroeder, C. E., & Wyart, V. (2014). Motor Contributions to the Temporal Precision of Auditory Attention.

- Nature Communications*, 5, Article No. 5255. <https://doi.org/10.1038/ncomms6255>
- Nani, A., Manuella, J., Liloia, D., Duca, S., Costa, T., & Cauda, F. (2019). The Neural Correlates of Time: A Meta-Analysis of Neuroimaging Studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31, 1796-1826. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01459
- Novembre, G., & Keller, P. E. (2014). A Conceptual Review on Action-Perception Coupling in the Musicians' Brain: What Is It Good For? *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, Article 603. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00603>
- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2005). Feeling the Beat: Movement Influences Infant Rhythm Perception. *Science*, 308, 1430-1430. <https://doi.org/10.1126/science.1110922>
- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2007). Hearing What the Body Feels: Auditory Encoding of Rhythmic Movement. *Cognition*, 105, 533-546. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.11.006>
- Press, C., Berlot, E., Bird, G., Ivry, R., & Cook, R. (2014). Moving Time: The Influence of Action on Duration Perception. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143, 1787-1793. <https://doi.org/10.1037/a0037650>
- Prinz, W. (1997). Perception and Action Planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 129-154. <https://doi.org/10.1080/713752551>
- Protopapa, F., Hayashi, M. J., Kulashkhar, S., van der Zwaag, W., Battistella, G., Murray, M. M. et al. (2019). Chronotopic Maps in Human Supplementary Motor Area. *PLOS Biology*, 17, e3000026. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000026>
- Singh, A., Cole, R. C., Espinoza, A. I., Evans, A., Cao, S., Cavanagh, J. F. et al. (2021). Timing Variability and Midfrontal ~4 Hz Rhythms Correlate with Cognition in Parkinson's Disease. *NPJ Parkinson's Disease*, 7, Article No. 14. <https://doi.org/10.1038/s41531-021-00158-x>
- Su, Y., & Pöppel, E. (2011). Body Movement Enhances the Extraction of Temporal Structures in Auditory Sequences. *Psychological Research*, 76, 373-382. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0346-3>
- Sugano, Y., Keetels, M., & Vroomen, J. (2014). Concurrent Sensorimotor Temporal Recalibration to Different Lags for the Left and Right Hand. *Frontiers in Psychology*, 5, Article 140. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00140>
- Suzuki, K., Lush, P., Seth, A. K., & Roseboom, W. (2019). Intentional Binding without Intentional Action. *Psychological Science*, 30, 842-853. <https://doi.org/10.1177/0956797619842191>
- Terao, M., Watanabe, J., Yagi, A., & Nishida, S. (2008). Reduction of Stimulus Visibility Compresses Apparent Time Intervals. *Nature Neuroscience*, 11, 541-542. <https://doi.org/10.1038/nn.2111>
- Tomassini, A., & Morrone, M. C. (2016). Perceived Visual Time Depends on Motor Preparation and Direction of Hand Movements. *Scientific Reports*, 6, Article No. 27947. <https://doi.org/10.1038/srep27947>
- Tomassini, A., Gori, M., Baud-Bovy, G., Sandini, G., & Morrone, M. C. (2014). Motor Commands Induce Time Compression for Tactile Stimuli. *Journal of Neuroscience*, 34, 9164-9172. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.2782-13.2014>
- Wenke, D., & Haggard, P. (2009). How Voluntary Actions Modulate Time Perception. *Experimental Brain Research*, 196, 311-318. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1848-8>
- Wiener, M., Zhou, W., Bader, F., & Joiner, W. M. (2019). Movement Improves the Quality of Temporal Perception and Decision-Making. *eNeuro*, 6, ENEURO.0042-19.2019. <https://doi.org/10.1523/eneuro.0042-19.2019>
- Yabe, Y., & Goodale, M. A. (2015). Time Flies When We Intend to Act: Temporal Distortion in a Go/No-Go Task. *The Journal of Neuroscience*, 35, 5023-5029. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4386-14.2015>
- Yamamoto, K. (2020). Cue Integration as a Common Mechanism for Action and Outcome Bindings. *Cognition*, 205, Article ID: 104423. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104423>
- Yang, S. C., Wolpert, D. M., & Lengyel, M. (2016). Theoretical Perspectives on Active Sensing. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 11, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.06.009>
- Yarrow, K., Haggard, P., Heal, R., Brown, P., & Rothwell, J. C. (2001). Illusory Perceptions of Space and Time Preserve Cross-Saccadic Perceptual Continuity. *Nature*, 414, 302-305. <https://doi.org/10.1038/35104551>
- Yokosaka, T., Kuroki, S., Nishida, S., & Watanabe, J. (2015). Apparent Time Interval of Visual Stimuli Is Compressed during Fast Hand Movement. *PLOS ONE*, 10, e0124901. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124901>
- Yon, D., Edey, R., Ivry, R. B., & Press, C. (2017). Time on Your Hands: Perceived Duration of Sensory Events Is Biased toward Concurrent Actions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 146, 182-193. <https://doi.org/10.1037/xge0000254>
- Zalta, A., Petkoski, S., & Morillon, B. (2020). Natural Rhythms of Periodic Temporal Attention. *Nature Communications*, 11, Article No. 1051. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14888-8>
- Zhou, L., Xing, L., Zheng, C., & Li, S. (2024). Moving Stimuli Enhance Beat Timing and Sensorimotor Coupling in Vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 50, 416-429. <https://doi.org/10.1037/xhp0001193>