

Rapid Temporal Recalibration of Auditory-Tactile Stimuli

Yanzhi Xu¹, Xiaoqin Wang^{1,2}

¹Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing

²Laboratory of Brain and Intelligence (THBI), Tsinghua University, Beijing
Email: xu2009yanzhi@163.com

Received: May 25th, 2020; accepted: Jun. 16th, 2020; published: Jun. 23rd, 2020

Abstract

This study investigated rapid temporal calibration during auditory-tactile multisensory integration. By using an auditory-tactile bimodal stimulation system and psychophysical methods, we measured 11 subjects' point of subjective simultaneity (PSS) in a simultaneity judgment task. We showed that the subject's PSS shifted rapidly after the exposure to single trial. We further showed that when the adaptive trial's stimulus onset asynchrony (SOA) varied, the PSS offset changed accordingly, but there was no significant change in PSS when the order of stimulus modality was switched. We conclude that rapid temporal recalibration occurs in audio-tactile integration, and the online recalibration mechanism is modulated by the adaptive trial's SOA magnitude.

Keywords

Multisensory Integration, Auditory-Tactile Integration, Temporal Calibration, Simultaneity Judgment, Point of Subjective Simultaneity

听触觉刺激快速时间校正

徐燕芝¹, 王小勤^{1,2}

¹清华大学医学院生物医学工程系, 北京

²清华大学脑与智能实验室, 北京

Email: xu2009yanzhi@163.com

收稿日期: 2020年5月25日; 录用日期: 2020年6月16日; 发布日期: 2020年6月23日

摘要

本文探究在听触觉多模态整合过程中, 是否存在快速时间校正的现象。我们利用听触觉双刺激系统, 采用心理物理实验的方法, 设计了同时性判断任务, 对11名被试者的听触觉感知主观同时性点进行了测量。结果发现, 仅在单次试次的适应情况下, 被试的听触觉感知的主观同时性点(PSS)就发生了偏移。并且当适应试次的SOA发生变化时, 主观同时性点的偏移量也会发生相应的变化; 而当适应试次的模态顺序发生变化时, 主观同时性点的偏移并未发生显著变化。结论: 听触觉刺激间存在着快速时间校正机制, 并且这种在线式的即时校正受到适应试次的SOA的调制。

关键词

多模态整合, 听觉触觉整合, 时间校正, 同时性判断, 主观同时性点

Copyright © 2020 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

我们生活在一个多模态信息的世界里, 周围环境中充斥着视觉、听觉、触觉等多个模态的信息, 一个复杂的事件往往由多重模态信息构成。相应地, 我们的大脑可以利用多模态整合(Multisensory Integration)的机制对来自不同感觉通道的信息进行加工, 这不仅加快了对复杂信息的处理速度, 而且极大提高了感知的精度。这种多模态的整合被研究证实存在于多个感知领域, 比如视听觉的整合和听触觉的整合等。不同模态的刺激在时间上的接近性是大脑判断是否对两个刺激进行整合的一个重要因素(Kayser & Logothetis, 2007)。当两个刺激在时间上是一致时, 多模态整合的效益将会达到最大化。例如在视听刺激中, 说话人的声音与视频中呈现的嘴唇运动同步时, 语言的可理解性将会最大化(Van Wassenhove, Grant, & Poeppel, 2007)。

但是由于一些因素比如刺激信号源之间的物理距离, 不同感觉通道之间的神经传导速度的差异等, 多模态的神经信号在大脑中的时间一致性通常很难达到。研究显示我们的大脑为这种广泛存在的时间不一致性提供了灵活的补偿机制。比如在视听觉刺激整合中, 由于视觉系统的视网膜采用了电化学的传感系统, 相较于快速的听觉传导系统, 延迟了约 30~50 ms (King & Palmer, 1985)。大量研究表明, 在近场中, 大脑可以将视听觉的主观性同时性(Point of Subjective Simultaneity, PSS)向视觉超前的方向移动(Fujisaki, 2004)。同时这种校正是非常灵活和迅速的, 不需要很长的时间适应。最近研究发现, 即使只经过单个试次的训练适应, 大脑也可以快速做出这种校正。这种近乎在线的及时的快速校正对于大脑快速对外界的情况做出判断和适应具有重要意义(Der Burg, Alais, & Cass, 2013)。此外在视触觉刺激中也发现了这种快速校正现象(Lange et al., 2018)。

听觉和触觉这两个通道之间存在着广泛的整合(Bellido, Barnes, & Crommett, 2018; Schurman et al., 2006)。例如在音乐感知中, 我们不仅可以听到音乐, 也可以利用触觉信息感受到音乐, 尤其是音乐的节奏等信息(Huang et al., 2012)。相关的 ERP (Event-Related Potential)研究也证实了, 听触模态混合的音乐节拍序列所诱发的 ERP 幅度相对于单模态的音乐节拍诱发的 ERP 幅度显著升高, 呈现出多模态整合中的超加性效应(吴天序&王小勤, 2016; Stein & Stanford, 2008)。目前针对听触觉刺激的时间校正研究较少, 本文则利用心理物理实验的方法, 对这一问题进行探讨, 并且对听触觉整合现象进行更深一步的研究。

2. 方法

2.1. 实验内容

本实验采用了同时性判断任务的范式(Simultaneity Judgment, SJ), 相比于其他的范式例如时间顺序判断(Time-Order Judgment), 这种任务更加易于执行。实验刺激材料为随机呈现的具有不同 SOAs (Stimulus Onset Asynchrony) ($\pm 300, \pm 150, \pm 125, \pm 100, \pm 75, \pm 50, \pm 25, 0$ ms)的听触觉双模态刺激配对, 其中听觉、触觉刺激均为 click 刺激, 刺激持续时间为 10 ms, 采样率为 44100 Hz。实验刺激均通过 MATLAB 软件生成, 呈现系统通过 Psychtoolbox 软件包完成。被试的任务是判断这两个刺激是否是同时发生的, 从而得到被试的同时性报告。

2.2. 被试

实验对象为 11 位清华大学在校生, 全部被试均无专业的音乐背景, 平均年龄为 21 ± 2 岁, 视力或校正视力正常, 听力正常, 触觉正常, 均为右利手。被试均被告知实验详情, 且签署了清华大学行为实验知情同意书。在实验结束后, 被试均获得了相应的报酬。

2.3. 实验系统

采用位于清华大学生物医学工程系听觉实验室的听触觉测试系统, 实验刺激由两个通路呈现, 一个通路以听觉模态呈现, 另一个通路以触觉模态呈现给被试。听觉刺激的播放采用专业级别的声学耳机(型号 HD280 Pro, Sennheiser)播放给被试。触觉刺激则通过压电陶瓷触觉刺激仪(PTS-C2, Dancer Design)呈现至被试的左手手指, 此刺激仪的输入信号与输出信号延时误差小于 1 ms。整个实验均在具有隔音效果的双层屏蔽室(IAC 1202-A)内进行。听觉刺激和触觉刺激的强度均会在正式实验前调整至各个被试的舒适水平。

2.4. 实验流程

被试按照自己舒适的姿势坐在屏蔽室内的椅子上, 佩戴耳机并正对前方设置的显示屏。屏幕上会显示任务提示说明, 15 个不同 SOAs 的刺激每个重复 30 次, 共计 450 个试次, 分成 3 个组, 按照完全随机的顺序呈现给被试, 被试需要对刺激的同时性做出按键反应。每组实验之间, 被试可以进行 5~8 分钟的休息, 整个实验进行约 40 分钟。实验流程如下图 1 所示:

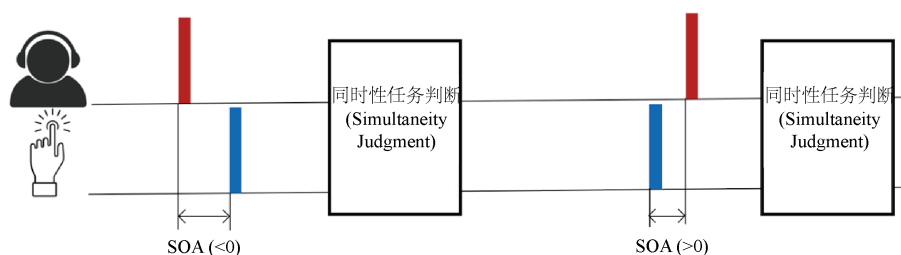


Figure 1. Experimental procedure of auditory and tactile simultaneity judgment

图 1. 听触觉同时性判断的实验流程

2.5. 数据处理

得到单个被试的同时性报告(Simultaneity Report, SR)数据后, 为了得到被试的 PSS (Point of Subjective Simultaneity, 定义为被试感知到的同时性概率最大时所对应的时间间隔), 通过观察数据分布的特点, 发

现数据呈现偏侧化的不对称分布, 因此采取了偏态高斯分布对数据进行了建模拟合(Yarrow et al., 2011; Van der Burg, Orchardmills, & Alais, 2015; Lange et al., 2018), 其中公式如下:

$$SR(SOA) = norm(SOA) * e * cdf(SOA)$$

$$norm = a + 1/b * \exp\left(-\frac{(SOA - c)^2}{d^2}\right)$$

cdf 指的是累积概率密度函数, *a*, *b*, *c*, *d*, *e* 均为参数。

为了分析上一个试次 Trial(*t*-1) 对当前试次时间校正的调制作用, 即听触觉刺激的快速校正是否存在, 我们主要考虑模态顺序(即听触觉刺激的先后)和 SOA 长短这两个影响因素。我们将数据进行拆分, 对于当前试次, 按照 Trial(*t*-1) 的模态呈现顺序分为“听触”(AT, 听觉在前, 触觉在后)和“触听”(TA, 触觉在前, 听觉在后)两组。我们把 Trial(*t*-1) 的 SOA 绝对值小于 100 ms 分为“短 SOA (Short)”, 大于或等于 100 ms 分为“长 SOA (Long)”两组, 分别进行拟合分析, 得到两种情况下的 PSS。对每种情况下的数据进行拟合后, 进行比较分析, 对于 PSS_AT 和 PSS_TA, PSS_Long 和 PSS_Short 分别进行双尾配对样本 *t* 检验, 其差值的正态性分布利用 Kolmogorov-Smirnov 方法进行检验, 设置 $p < 0.05$ 作为显著性水平。

同时为了考虑刺激模态顺序和 SOA 长短两个因素之间是否存在相互作用, 我们将模态顺序(听触, 触听)、SOA (长, 短)做了 2×2 的重复测量方差分析, 做方差分析前利用 Kolmogorov-Smirnov 法对数据的正态性分布进行了检验, 利用 Leven 方法对数据的方差齐性进行了检验。

3. 实验结果

3.1. 听触觉的快速时间校正结果: 模态呈现顺序组比较

图 2 所示的为当 Trial(*t*-1) 分别为 AT 和 TA 时的数据以及曲线拟合的结果。由图 2(a)可以看出, 前一试次的刺激模态顺序不会影响被试者的同时性报告数据的分布, 两种情况下的拟合曲线也是相似的。图 2(b) 的 PSS (拟合曲线的峰值点对应的坐标 SOA 的值)对同时性数据进行了量化, 结果显示, 两种情况下的 PSS 经过双尾配对样本 *t* 检验后, 不存在统计性显著差异。

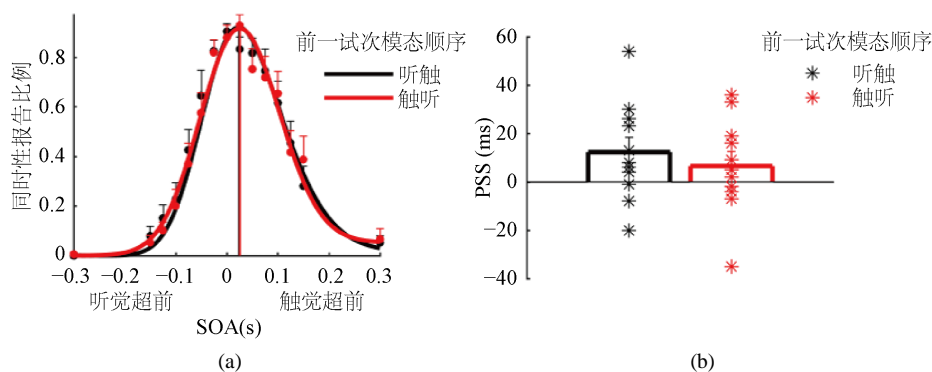


Figure 2. Mean simultaneity reports and PSS measurement with the preceding trial's modality order into consideration, PSS_AT and PSS_TA respectively. (a) Mean simultaneity reports for two conditions: Trial(*t*-1) with AT order and TA order, black represents the preceding trial's modality order is AT; red means TA modality order; error represents standard error of mean. (b) Each subject's PSS in AT and TA respectively and averaged PSS across subjects, each "*" represents the PSS of single subject

图 2. 前一试次的模态顺序为听触和触听条件下, 被试的同时性报告数据分布和主观同时性点的测量。(a) 两种情况下所有被试的平均同时性报告数据分布, 黑色表示上一试次的模态顺序是听触, 红色表示上一试次的模态顺序是触听, 所标误差为均值标准误差; (b) 两种情况下, 所有被试的主观同时性点的值和平均值, 每个 "*" 代表单个被试的主观同时性点

3.2. 听触觉的快速时间校正结果：长短 SOA 组比较

图 3 所示的为当 Trial(t-1) 分别为长 SOA 和短 SOA 两种情况下被试的反应及拟合结果。由图 3(a) 可以看出, Trial(t-1) 为长 SOA 和 Trial(t-1) 为短 SOA 两种情况下, 被试的同时性报告数据分布是不一样的。具体的, Trial(t-1) 为长 SOA 相对于 Trial(t-1) 为短 SOA 时, 被试者的同时性曲线向触觉超前的方向发生了偏移。图 3(b) 显示的两种情况下的 PSS 分布对这种偏移进行了量化, 经双尾配对样本 t 检验显示($t(10) = 3.730, p = 0.004$), PSS_Long 显著高于 PSS_Short。进一步地, 我们用 $\Delta PSS(PSS_Long - PSS_Short)$ 来作为校正效应大小的量化方式, 在这个分析中 ΔPSS 为 16.36 ms。

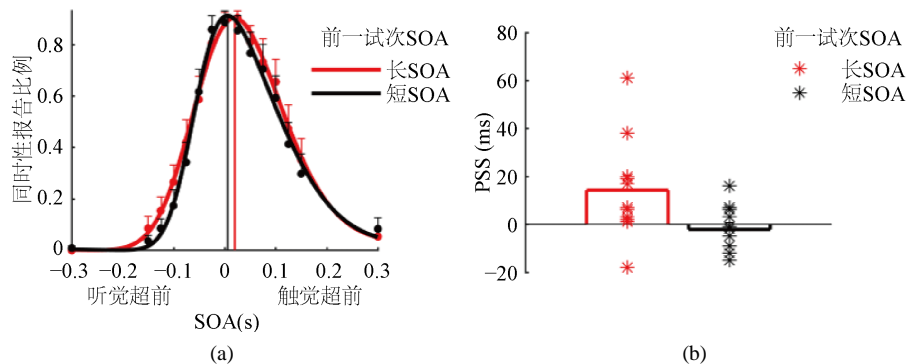


Figure 3. Mean simultaneity reports and PSS measurement with the preceding trial's SOA into consideration, PSS_Long and PSS_Short respectively. (a) Mean simultaneity reports for two conditions: Trial(t-1)'s SOA longer than 100 ms (Long) and shorter than 100 ms (Short), show in red and black. (b) Each subject's PSS in long SOA and short SOA respectively and averaged PSS across subjects

图 3. 前一试次的 SOA 为长和短两种情况下, 被试的同时性报告数据分布和主观同时性点的测量。(a) 两种情况下所有被试的平均同时性报告数据分布, 红色表示上一试次是长 SOA 的刺激, 黑色表示上一试次是短 SOA 的刺激; (b) 两种情况下, 所有被试的主观同时性点的值和平均值

3.3. 两种因素交互下的快速时间校正(模态顺序 SOA × 长短)

图 4 进一步展示了模态顺序和 SOA 长短之间的交互作用, 图 4(a) 显示的是四种情况下所有被试的同时性数据分布, 图 4(b) 是四种情况下的 PSS 值的分布及均值结果。我们对四种情况(听触, 触听) × (SOA 长, SOA 短) 进行了统计分析, 采用重复测量 2×2 ANOVA 进行了统计, 结果发现, SOA 长短对听触觉的快速时间校正具有主效应($F(1,40) = 5.558, p = 0.023$), 而模态顺序的主效应不显著, 同时 SOA 长短与模态顺序间不存在交互作用。

4. 讨论

我们生活中在一个多模态的世界里, 大脑对多模态信息的整合有助于提高感知的速度和精度。例如在钢琴学习中, 琴键声音和按压琴键的触觉联合反馈可以更好地提高演奏者的技巧(Lappe et al., 2011)。理论认为, 多模态信息的时间同步性被认为是大脑进行多模态信息整合必要条件(Meredith, Nemitz, & Stein, 1987)。而我们的大脑也可以对由于物理延迟或者神经潜伏期不同造成的延迟, 进行灵活的校正。这种校正不需要很长时间的适应, 甚至在单个事件的刺激下, 就可以产生这种快速同步校正。在本实验中, 我们通过同时性判断任务, 发现在听触觉刺激中, 存在这种快速时间校正现象, 并且这种校正受到上一试次的 SOA 长短调制。

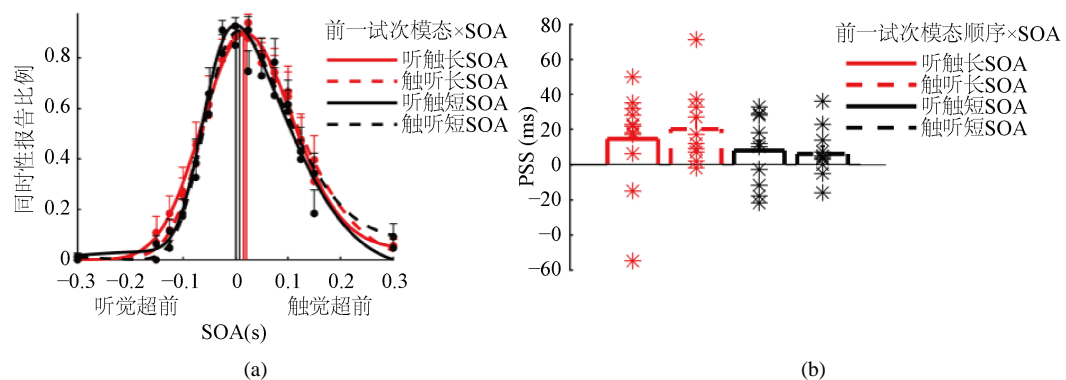


Figure 4. Mean simultaneity reports and PSS measurement with Trial($t-1$) modality order \times SOA length. (a)

Mean simultaneity reports for four conditions: auditory leading and long SOA, tactile leading and long SOA, auditory leading and short SOA, tactile leading and short SOA; (b) Each subject's PSS in AT_Long, TA_Long, AT_Short, TA_Short and averaged PSS across subjects

图 4. 前一试次为“模态顺序 \times SOA 长短”情况下, 被试的同时性报告数据分布和主观同时性点的测量。(a) 四种情况下所有被试的同时性报告数据分布: 听触长 SOA, 触听长 SOA, 听触短 SOA, 触听短 SOA; (b) 所有被试在四种情况下的主观同时性点的值和平均值

相较于之前报道过的视听觉刺激的快速校正现象, PSS 约为 30~50 ms, 听触觉的同时性可塑性稍弱一些。值得指出的一点是, 与视觉和听觉不同的是, 触觉感知必须与感官器官(皮肤)接触, 所以在导致不同模态刺激异步性的因素里, 其物理转导的时间可变性比较小。因而触觉与其他模态的同步性校正中, 其可塑性和灵活性相对较小一些, 在校正的时间尺度上也会有所不同。

在本研究中发现听触觉的 PSS 受上一试次的 SOA 的长短的调制。在上一试次是较长 SOA 情况下, PSS 的偏移量明显高于上一试次是短 SOA 情况下。但是并不是 SOA 越大, PSS 的偏移量就越大。大脑对于多模态刺激的整合, 有一个整合时间窗, 只要两个刺激时间落入这个窗内, 就可以被整合成一个统一的事件, 当刺激间的间隔超出了这个时间窗, 大脑则会进行时间校准(Spence & Squire, 2003)。但是时间校准的作用范围也是有限制的, 在视听领域内, 校正效应在 SOA 为 100~200 ms 时最大, 这一间隔的两个刺激被试往往认为是不同时的, 却是相关的(Fujisaki, 2004)。随着间隔的变大, 大脑会认为两个刺激是不相关的, 大脑产生整合的概率也很低。在视听领域, 时间校准的作用范围在 2500 ms 以内(Der Burg, Alais, & Cass, 2013), 对于听触觉领域还需要更多的研究。

5. 结论

本文针对听触觉领域是否存在快速时间校正这一问题, 设计了同时性判别任务, 对这一问题进行了研究。结果发现, 听触觉领域存在着快速在线式的时间校正, 并且这种校正程度受到上一次的 SOA 长短的调制, 显示了听触觉整合在时间维度上的可塑性。

参考文献

- 吴天序, 王小勤(2016). 基于 ERP 和稳态诱发电位的听觉和触觉整合研究. *北京生物医学工程*, 35(4), 347-352.
- Bellido, A. P., Barnes, K. A., Crommett, L.E. et al. (2018). Auditory Frequency Representations in Human Somatosensory cortex. *Cerebral Cortex*, 28, 3908-3921. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx255>
- Der Burg, E. V., Alais, D., & Cass, J. (2013). Rapid Recalibration to Audiovisual Asynchrony. *The Journal of Neuroscience*, 33, 14633-14637. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1182-13.2013>
- Fujisaki, W. (2004). Recalibration of Audiovisual Simultaneity. *Nature Neuroscience*, 7, 773-778. <https://doi.org/10.1038/nn1268>

- Huang, J., Gamble, D., Sarnlertsophon, K., Wang, X., & Hsiao, S. S. (2012). Feeling Music: Integration of Auditory and Tactile Inputs in Musical Meter Perception. *PLoS ONE*, 7, e48496. <https://doi.org/10.1007/s00429-007-0154-0>
- Kayser, C., & Logothetis, N. K. (2007). Do Early Sensory Cortices Integrate Cross-Modal Information? *Brain Structure & Function*, 212, 121-132. <https://doi.org/10.1007/s00429-007-0154-0>
- King, A. J., & Palmer, A. R. (1985). Integration of Visual and Auditory Information in Bimodal Neurons in the Guinea-Pig Superior Colliculus. *Experimental Brain Research*, 60, 492-500. <https://doi.org/10.1007/BF00236934>
- Lange, J., Kapala, K., Krause, H., Baumgarten, T. J., & Schnitzler, A. (2018). Rapid Temporal Recalibration to Visuo-Tactile Stimuli. *Experimental Brain Research*, 236, 347-354. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5132-z>
- Lappe, C., Trainor, L. J., Herholz, S. C., & Pantev, C. (2011). Cortical Plasticity Induced by Short-Term Multimodal Musical Rhythm Training. *PLoS ONE*, 6, e21493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021493>
- Meredith, M.A., Nemitz, J. W., & Stein, B. E. (1987). Determinants of Multisensory Integration in Superior Colliculus Neurons. I. Temporal Factors. *The Journal of Neuroscience*, 7, 3215-3229. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.07-10-03215.1987>
- Schurman, M., Caetano, G., Hlushchuk, Y., Jousmaki, V., & Hari, R. (2006). Touch Activates Human Auditory Cortex. *Neuroimage*, 30, 1325-1331. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.11.020>
- Spence, C., & Squire, S. (2003). Multisensory Integration: Maintaining the Perception of Synchrony. *Current Biology*, 13, 519-521. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(03\)00445-7](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(03)00445-7)
- Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory Integration: Current Issues from the Perspective of the Single Neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 255-266. <https://doi.org/10.1038/nrn2331>
- Van der Burg, E., Orchardmills, E., & Alais, D. (2015). Rapid Temporal Recalibration Is Unique to Audiovisual Stimuli. *Experimental Brain Research*, 233, 53-59. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4085-8>
- Van Wassenhove, V., Grant, K. W., & Poeppel, D. (2007). Temporal Window of Integration in Auditory-Visual Speech Perception. *Neuropsychologia*, 45, 598-607. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.001>
- Yarrow, K., Jahn, N., Durant, S., & Arnold, D. H. (2011). Shifts of Criteria or Neural Timing? The Assumptions Underlying Timing Perception Studies. *Consciousness and Cognition*, 20, 1518-1531. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.07.003>