

# 時間予測が聴触覚の時間順序判断に及ぼす影響

吉田 祥平\*<sup>1</sup> 横山 正典\*<sup>1</sup> 野澤 孝之\*<sup>2</sup> 緒方 大樹\*<sup>3</sup> 三宅 美博\*<sup>1</sup>

The Effect of the Time Prediction on Audio-Haptic Temporal Order Judgement

Shohei Yoshida\*<sup>1</sup>, Masanori Yokoyama\*<sup>1</sup>, Takayuki Nozawa\*<sup>2</sup>, Taiki Ogata\*<sup>3</sup>, and Yoshihiro Miyake\*<sup>1</sup>

**Abstract** – In this study, we investigated the effect of the time prediction on time perception. Participants made temporal order judgements (TOJs) regarding pairs of auditory and haptic stimuli under Fix (predictable) condition and under Random (unpredictable) condition. The results revealed that JNDs (Just Noticeable Differences) under Fix condition were lower than under Random condition, and PSSs (Point of Subjective Simultaneity) were haptic-first side under each condition and the preceding amount was lower under Fix condition than under Random condition. These results suggest that participants pay stronger attention to unpredictable haptic stimuli than to predictable auditory stimuli under Fix condition.

**Keywords** : simultaneity, temporal order judgement, time perception, time prediction, audio-haptic

## 1. はじめに

人間は視覚や聴覚、触覚など複数の感覚情報によって、環境を把握している。複数の感覚情報は、脳内で統合される必要があるが、その際に1つの対象やイベントに由来する情報を、同一の事象に属すると知覚するためには、感覚間の時間的な整合性が必要であるとされている<sup>[1][2]</sup>。つまり感覚情報統合のメカニズムを理解するためには、異種感覚間の時間知覚特性を調査することが必要不可欠である。

このような異種感覚間の時間知覚特性を調査するための課題の1つに時間順序判断課題がある。時間順序判断課題とは、提示された2つの刺激がどちらが先であったかを判断する課題であり、2つの指標を用いて時間知覚特性を評価することが出来る<sup>[3]</sup>。1つ目は、時間分解能を表す指標である刺激間のズレの弁別閾値 (JND: just noticeable difference) である。2つ目は、人間が最も同時であると知覚しやすい点である主観的同時点 (PSS: point of subjective simultaneity) である。この主観的同時点は、経験を積んだ被験者では、物理的同時点とほぼ一致するが<sup>[4]</sup>、多くの場合、人

間の主観的同時点は物理的同時点と必ずしも一致しないことが報告されている<sup>[5]</sup>。さらに近年では、注意や経験など様々な要因に依存して動的に変化することが明らかにされている<sup>[6][7]</sup>。そのため、刺激間のズレの弁別閾値や主観的同時点で評価される人間の時間知覚特性がどのような要因で変化するかが注目されている。

このように時間順序判断課題を用いて時間知覚特性に関する研究がなされている一方で、同期タッピング課題を用いて感覚刺激に対する運動の同期メカニズムの解明を目的とした研究も進められている<sup>[8][9]</sup>。同期タッピング課題とは、周期的に提示されるリズム刺激にタップ動作を同期させる課題である<sup>[10]</sup>。周期的な刺激を用いることで、直前の刺激間隔から次に刺激が提示されるであろう時刻を予測することが可能になる。つまり、同期タッピング課題では予測可能な感覚刺激に対して同期を行っていると考えられる。この課題において、タップ動作が聴覚刺激に対して20～50[ms]先行する負の非同期 (NA: Negative Asynchrony) と呼ばれる現象が観察されている<sup>[11]</sup>。この現象は、触覚刺激が先行する側に主観的同時点が存在するという点では、時間順序判断課題での知見と一致するものが、時間順序判断課題では主観的同時点と物理的同時点のズレは10数[ms]程度であり<sup>[7]</sup>、量的な面では一致しているとは言えない。

またこの知見は周期的な刺激を用いることで、刺激提示時刻の時間予測が可能であるとき、主観的同時点

\*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

\*2: 東京農業工業大学 共生科学技術研究院

\*3: 東京大学 インテリジェント・モデリング・ラボラトリー

\*1: Tokyo Institute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering

\*2: Tokyo University of Agriculture and Technology, Institute of Symbiotic Science and Technology

\*3: The University of Tokyo, Intelligent Modeling Laboratory

は物理的同時点から遠ざかるようという結果を与えている。他方で、視触覚の時間順序判断課題を用いて随意運動に対する視覚フィードバックの有無による時間知覚特性の変化を調べた研究からは、視覚フィードバックにより対象とする視覚刺激の刺激提示時刻が予測できる条件のとき、刺激提示時刻が予測出来ない条件よりも主観的同時点が物理的同時点に近づくという知見を得ている<sup>[12]</sup>。また予測が出来る視覚フィードバックがある条件の時、刺激間のズレの弁別閾は狭まるという結果を得ている。さらに視覚の時間順序判断課題を用いた先行研究において、予め刺激提示時刻が予測できるような Cue を与えた時、予測通りに Target となる刺激が提示される条件の方が、予測通りに Target となる刺激が提示されない条件よりも刺激間のズレの弁別閾を狭めることが報告されている<sup>[13]</sup>。

以上のことから、先行研究では運動など様々な要因が含まれていたり、単一モダリティではあるといった違いはあるが、異種感覚間の時間順序判断課題においても、刺激提示時刻の時間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭めるという仮説を立てることが出来る。しかし主観的同時点に対しては、刺激提示時刻の時間予測が何らかの影響を及ぼすことを示唆する知見はあるが、結果が一致しておらず、どのように影響を及ぼすかは調査されていない。

そこで本研究では、聴触覚の時間順序判断課題を聴覚刺激の提示時刻が予測できる条件と予測できない条件の2条件で行い、各条件における刺激間のズレの弁別閾と主観的同時点を比較することで、刺激提示時刻の時間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭めるという作業仮説を実証すると共に、主観的同時点がどのように変化するかを観察し、刺激提示時刻の時間予測が時間知覚特性に対してどのような役割を果たしているのかを調査することを目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 被験者

被験者は、20代(平均23歳)の健康で右利きの男性7名であり、すべての被験者が正常な聴力を有することを確認した。

### 2.2 実験装置と刺激

実験は、聴覚刺激を阻害する恐れのある雑音を排除するために、カナルタイプのイヤホンを用い、さらに遮音性の高いイヤーマフを着用させることで、出来る限り静音下で行った。聴覚刺激は、残響の影響が少ないとされるホワイトノイズ(50[dB], 15[ms])を両耳に提示した。また触覚刺激は、Haptics Deviceである

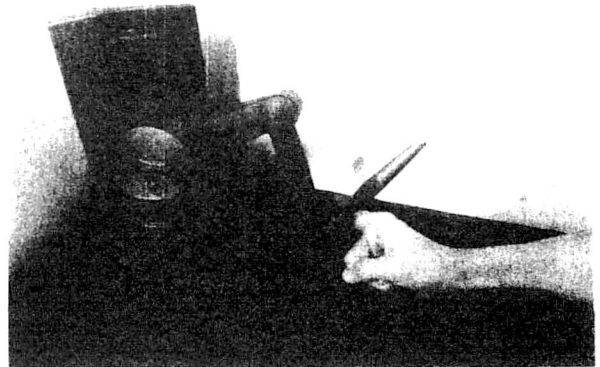


図1 実験装置

Fig.1 Haptic stimulus was presented to participant's right hand by Haptic Device.

PHANTOM Desktop (SensAble)を用いて力覚(3[N], 15[ms])を被験者の右手に提示した(Fig.1)。これらの刺激提示システムは、PHANTOM Desktopの動作保証のあるPC(HP xw4600/CT Workstation)を用いて構築し、OS(Windows XP)上で起動するアプリケーションであるVisual C++ 2008を用いて開発および制御を行った。また刺激提示の際に生じる時間的な誤差は、どちらの刺激も1[ms]以下であった。

### 2.3 実験課題

本研究の課題は、聴触覚の時間順序判断課題を用いた。この課題では、被験者は試行開始を告げるCue(聴覚刺激)の後に提示されるTarget(聴覚刺激)とそれに合わせて提示される触覚刺激のどちらが先に提示されたかを回答する。

### 2.4 実験条件

被験者は、聴覚刺激の提示時刻が予測できるFix条件と予測できないRandom条件の2種類の時間順序判断課題を行った(Fig.2)。Fix条件では、聴覚刺激の提示時刻が予測できるように、CueとTargetの提示時刻の間隔であるISI(Inter Stimulus-onset Interval)を800[ms]に固定した。一方で、Random条件は聴覚刺激の提示時刻が予測できないように、試行ごとにISIを600~1000[ms]の間でランダムに決定した。聴覚刺激を基準としたときの触覚刺激との刺激提示時刻のズレであるSOA(Stimulus Onset Asynchrony)は、先行研究に従って±90, ±60, ±30, 0[ms]の7種類を用いた(負のSOAが触覚刺激先行を表す)<sup>[12]</sup>。

### 2.5 実験デザイン

実験全体は、練習(1ブロック)および本実験(5ブロック)の計6ブロックで構成される。1ブロックは、

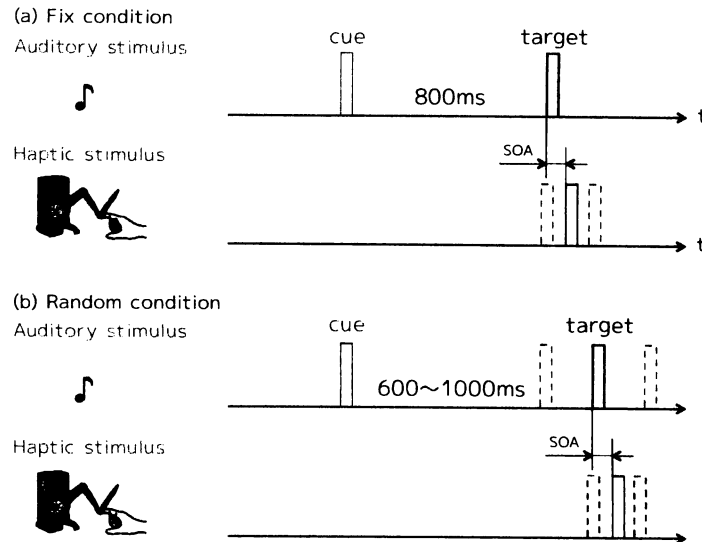


図2 実験条件

Fig. 2 This study has two experimental conditions. (a) Fix condition (predictable): ISI(Inter Stimulus-onset Interval)=800[ms]. (b) Random condition (unpredictable): ISI=600 1000[ms].

Fix 条件 (1 セッション) と Random 条件 (1 セッション) の計 2 セッションに分けられ、それぞれのセッションは各 SOA を 5 試行ずつ行うため、35 試行の時間順序判断課題から構成される。実験で行った全試行数は、420 試行であり、ISI や SOA などの実験条件はランダムに決定される。また実験全体の所要時間は 1 時間程度であった。

## 2.6 実験手順

試行が開始すると、まず聴覚刺激による Cue が提示される。その後、条件毎に定めた ISI に従って、Target となる聴覚刺激が提示され、それに合わせて触覚刺激を提示した。その際の触覚刺激提示時刻は、SOA に従った。刺激が提示された後、被験者は聴覚刺激と触覚刺激のどちらが先に提示されたかを二肢強制選択により判断し、左手でキーボードを用いて回答させた。試行間の休憩は、回答が完了してから 2000[ms] とした。また試行中は視覚からの影響を排除するために瞑目させ、手足など身体の一部を動かしてリズムを取ることを禁止した。

## 2.7 解析手順

各 SOA に対して聴覚刺激が先であると回答した頻度を算出し、縦軸に聴覚刺激が先である回答した頻度、横軸に SOA を取りプロットした。また被験者の回答は、二項分布に従うと考えられるため、一般化線型モデルに基づきロジスティック曲線により回帰した。回

帰式として、以下の式を用いた。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\alpha - x}{\beta}}} \quad (1)$$

また回帰によって得られる  $\alpha$  および  $\beta$  を用いて、刺激間のズレの弁別閾値 (JND) と主観的同時点 (PSS) は以下の式のように定義する。

$$JND = \frac{(x_{0.75} - x_{0.25})}{2} \quad (2)$$

$$= \beta \log 3 \quad (3)$$

$$PSS = x_{0.5} \quad (4)$$

$$= \alpha \quad (5)$$

このとき、 $x_p$  は聴覚刺激が先と回答した割合 (縦軸  $y$  の値) が  $p$  の時の刺激間のズレの大きさ ( $x$  軸の値) である。

## 3. 結果

まず被験者ごとに聴覚刺激が先と回答した頻度を算出したところ、7 名中 1 名の被験者ですべての SOA 条件において、正答率が 50[%] 程であり、課題が適切に行えなかったと判断された。そのため、この被験者を除いた 6 名のデータで以下の解析を行った。

すべての被験者の平均から算出した実験結果を Fig.3 に示す。また Fig.3 の回帰曲線から得られたすべての被験者の平均の刺激間のズレの弁別閾値 (JND) および主観的同时点 (PSS) を Fig.4, 5 に示す。この結果から、

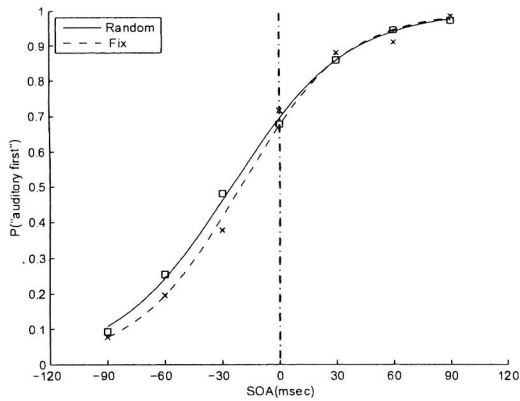


図3 時間順序判断課題の結果と心理物理曲線  
 Fig.3 TOJ data and average psychometric functions across all subjects under each condition.

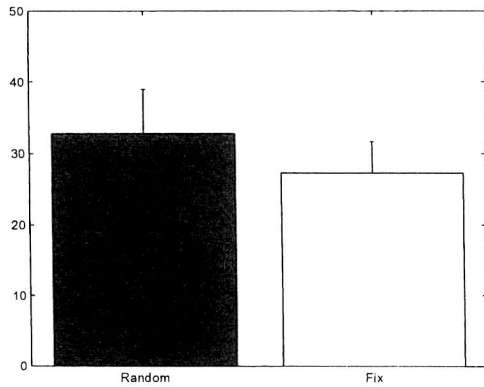


図4 刺激間のズレの弁別閾値 (JND)  
 Fig.4 Just Noticeable Difference (JNDs) under each condition. The errors bars indicate the inter-subject standard errors of the means.

刺激間のズレの弁別閾値は、Random 条件で 32.8[ms]、Fix 条件で 27.3[ms] であり、対応のある t 検定の結果、有意差は無かったものの Fix 条件の方が Random 条件よりも狭まる傾向があった ( $t(5)=1.93, P=0.11$ )。また主観的同時点はどちらの条件でも負の値 (Random 条件:  $-25.5$ [ms] vs. Fix 条件:  $-20.6$ [ms]) を取り、対応のある t 検定の結果、有意差はなかったものの Fix 条件の方が Random 条件よりも物理的同時点からの時間差が小さい傾向があった ( $t(5)=-1.58, P=0.18$ )。

#### 4. 考察

実験の結果、有意差は確認されていないが、聴覚刺激の提示時刻の時間予測が出来る Fix 条件の方が、刺

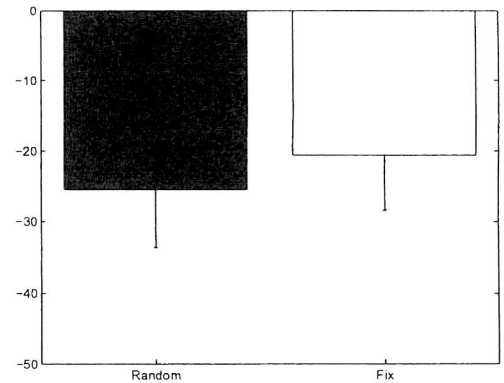


図5 主観的同時点 (PSS)  
 Fig.5 Point of Subjective Simultaneity (PSSs) for under each condition. The errors bars indicate the inter-subject standard errors of the means.

激提示時刻の時間予測ができない Random 条件よりも、刺激間のズレの弁別閾が狭まる傾向を確認した。この結果は、運動という要素の有無の違いはあるが、先行研究と同様の傾向を示す結果であり [12] [13]、刺激提示時刻の時間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭めるという仮説を支持する。この原因の1つとして、時間的な選択的注意の影響が考えられる。視覚の時間順序判断課題を用いた先行研究では、刺激提示時刻の時間予測が出来ることによって、刺激提示時刻付近に時間的な選択的注意が促進され、時間分解能が上昇したために刺激間のズレの弁別閾が狭まったと考えられている [13]。このことから、異種感覚間の時間順序判断課題においても、刺激提示時刻が予測できる時間予測によって時間的な選択的注意が促進され、刺激間のズレの弁別閾が狭まったと考えられる。

また主観的同時点は、Fix 条件と Random 条件のどちらの条件でも聴覚刺激が先行する点に位置した。この結果は、聴覚の時間順序判断課題を用いた先行研究の結果と一致する [5]。さらに Fix 条件では、主観的同時点が Random 条件よりも小さい値を取り、物理的同時点に近づいた。この結果を相対的に解釈すると、主観的同時点が聴覚刺激先行側に移動したということになる。主観的同時点を移動させる要因の1つとして、注意を向けた感覚情報の方がもう一方よりも先行しているように感じやすくなるという知見がある (prior entry effect) [3]。刺激間のズレの弁別閾が狭まっていることから、時間予測が選択的注意を促進する効果があると考えられるため、prior entry effect が本研究

での主観的同時点の移動に関与していると考えられる。本研究では、時間予測が出来ることによって主観的同時点は聴覚刺激先行側にずれた。prior entry effectに従えば、刺激提示時刻が予測できる聴覚刺激ではなく、試行ごとに刺激提示時刻が変化する触覚刺激に選択的注意が強く向いたことになる。一見、刺激提示時刻が予測できる聴覚刺激ではなく、刺激提示時刻が予測できない触覚刺激に選択的注意を強く向けるという結果は意外である。しかし実験後に行ったアンケートでは、実際に被験者はFix条件の時に触覚刺激に注意を向けていたと回答している。つまり、Fix条件において被験者は、聴覚刺激の提示時刻が予測できることによって、触覚刺激の提示時刻の把握に選択的注意を強く向けることができた。そして、選択的注意によって触覚刺激の処理が促進され、主観的同時点が聴覚刺激先行側にずれたと考えられる。

しかし、本研究の結果には選択的注意とは違った解釈も考えられる。そのひとつが、刺激提示時刻の時間予測ができることによるフィルタのような働きによる効果である。刺激提示時刻の時間予測ができることで、予測した時刻周辺で次に聴覚刺激が起こるだろうというトップダウン的な判断が、感覚刺激の時間知覚のばらつきを除去するようフィルタのように働き、刺激間のズレの弁別閾を狭めていると考えられる。刺激提示時間長が一定の繰り返し刺激を用いて、刺激提示時刻を予測できる条件で時間長を評価させた先行研究では、刺激提示時刻を予測できない最初の刺激の提示時間長よりも、繰り返される後の刺激の提示時間長がより短かく知覚される repetition suppression という効果が確認されている<sup>[14]</sup>。この知見から、刺激提示時刻を予測できる聴覚刺激の知覚にも変化が起こっていることが示唆され、刺激提示時刻の時間予測がフィルタのように働くことを支持すると考えられる。さらに、刺激提示時刻の時間予測ができることで、時間知覚のばらつきを除去するようにそれぞれの検出信号の端をフィルタアウトすることで、2つの検出信号のピークがより近づき、それにより主観的同時点が物理的同時点に近づくと考えられる。同時と感じる触覚刺激と聴覚刺激の提示時刻は、物理的に近づくと考えられる。このように本研究の結果に対して、刺激提示時刻の予測に基づくフィルタのように働くことによる影響という注意とは別の解釈を行うことができる。しかし、聴覚系の注意の効果を調査した先行研究では、このようなフィルタリングを行うための時間窓の形成には選択的注意が影響しているとされている<sup>[15]</sup>。そのため、刺激提示時刻の予測に基づくフィルタのように働

くことによる影響という観点からも、本研究の結果は選択的注意が影響していると考えられる。

以上のように、刺激提示時刻の時間予測が出来るFix条件において、刺激間のズレの弁別値が狭まり、主観的同時点が聴覚先行側にずれたことに選択的注意が影響していることが示唆できた。しかし、結果に一定の傾向が見られるものの有意差が確認されていない。そこで今後は、被験者を増やし、統計的な解析を行っていく予定である。

## 5. まとめ

本研究では、聴覚の時間順序判断課題を、聴覚刺激の提示時刻が予測できるFix条件と予測できないRandom条件の2条件で行い、刺激間のズレの弁別閾値と主観的同時点を比較することで、時間予測が時間知覚特性に及ぼす影響について検討した。

その結果、刺激提示時刻の時間予測ができることで、刺激間のズレの弁別閾を狭めるという仮説を支持する結果を得た。また刺激提示時刻の時間予測が出来ることで、主観的同時点が聴覚先行側にずれるという結果を得た。そして先行研究や被験者の内省報告から、一方の感覚の刺激提示時刻が予測できることによって、選択的注意が促進され、結果に影響を及ぼすことを示唆した。

しかし、本研究の結果は、一定の傾向は見られたものの統計的に有意な結果を得ていない。さらに選択的注意がどちらのモダリティに強く働くのかなどは未だに不明である。そこで、今後は被験者を増やし、統計的な解析を行うことで、時間予測が刺激間のズレの弁別閾を狭め、主観的同時点を聴覚先行側にずらすという仮説を実証し、被験者の注意を統制することで、選択的注意がどのように時間知覚に影響を及ぼすかを明らかにし、異種感覚統合のメカニズムを理解するための知見を得ることを目指す。

## 参考文献

- [1] M.A. Meredith. On the neuronal basis for multisensory convergence: a brief overview. *Cognitive Brain Research*, 14(1):31-40, 2002.
- [2] D.A. Slutsky and G.H. Recanzone. Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. *Neuroreport*, 12(1):7, 2001.
- [3] C. Spence, D.I. Shore, and R.M. Klein. Multisensory prior entry. *Journal of Experimental Psychology General*, 130(4):799-832, 2001.
- [4] R. Efron. The effect of handedness on the perception of simultaneity and temporal order. *Brain*, 86(2):276, 1963.
- [5] M. Zampini, S. Guest, D.I. Shore, and C. Spence.

- Audio-visual simultaneity judgments. *Perception and Psychophysics*, 67(3):531–544, 2005.
- [6] M.J. Pesavento and J. Schlag. Transfer of learned perception of sensorimotor simultaneity. *Experimental Brain Research*, 174(3):435–442, 2006.
- [7] J.V.M. Hanson, J. Heron, and D. Whitaker. Recalibration of perceived time across sensory modalities. *Experimental Brain Research*, 185(2):347–352, 2008.
- [8] MH Thaut, B. Tian, and MR Azimi-Sadjadi. Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment. *Human Movement Science*, 17(6):839–863, 1998.
- [9] Y. Miyake, Y. Onishi, and E. Poeppel. Two types of anticipation in synchronous tapping. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64:415–426, 2004.
- [10] L.T. Stevens. On the time-sense. *Mind*, 11(43):393–404, 1886.
- [11] K. Dunlap. Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize. *Psychological Review*, 17(6):399–416, 1910.
- [12] Z. Shi, S. Hirche, WX Schneider, and H. Muller. Influence of visuomotor action on visual-haptic simultaneous perception: A psychophysical study. In *Proceedings of the 2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 65–70. IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2008.
- [13] A. Correa, D. Sanabria, C. Spence, P. Tudela, and J. Lupianez. Selective temporal attention enhances the temporal resolution of visual perception: Evidence from a temporal order judgment task. *Brain research*, 1070(1):202–205, 2006.
- [14] V. Pariyadath and D. Eagleman. The effect of predictability on subjective duration. *PLoS One*, 2(11), 2007.
- [15] T. Mukai, H. Miyazono, T. Usagawa, and M. Ebata. Effect of an attention on auditory time window: Temporal analog of the attention filter. *Technical report of IEICE. EA*, 99(259):9–14, 1999.