

協調タッピングにおけるタイミング制御機構の分析とモデル化

○長尾 嵩利 (東京工業大学), 小川 健一郎(東京工業大学), 廣部 祐樹(東京工業大学),
三宅 美博(東京工業大学)

Analysis and model of the timing control structure for cooperative tapping

○Takatoshi NAGAO (The institute of Technology), Kenichiro OGAWA (The institute of Technology)

Yuki HIROBE(The institute of Technology), Yoshihiro MIYAKE (The institute of Technology)

Abstract: We carry out many cooperative tasks with others in our daily life. To unravel the mechanism of timing generation in such cooperative tasks, many researchers conducted experiments on cooperative tapping and many models have been proposed. However, these models focused on only phase difference (synchronization error: SE). In this study, we propose a new model that includes self and another periods (inter tap-onset intervals: ITIs) in addition to SE. Then, from the contribution ratio of self and another periods, and phase difference, I estimated the mechanism of the cognitive process of temporal perception in cooperative tasks.

Keywords: cooperative tapping, timing control, mutual synchronization, psychological model

1.はじめに

我々の研究グループでは、人間の対面コミュニケーションにおける同調という現象の重要性に注目してきた。これはコミュニケーションにおけるコンテキストの共有につながるプロセスであり、その際に認知的な予測性や同時性などの時間的な特徴が確認されている。これらの特徴を人工的に再現し、人間同士の協調プロセスを支援できる人工システムを構築することを我々はめざしている。そのために、今まで、コミュニケーションや協調作業におけるタイミング共有の重要性に着目して研究を進めてきた^[1-3]。

コミュニケーションにおけるタイミングの先行研究としては、2者間の対話コミュニケーションにおける発話タイミングを解析した研究がある^[4]。また相手の発話開始の直後あるいは発話の終了時に、適切なタイミングで頷きなどの行動を入れることにより、会話が円滑に進むという報告がなされている^[5]。また、並んで椅子の上に座り、その椅子を揺らすことで意図せずにその振動が同調すること^[6]や、母子コミュニケーションで幼児の運動と母親の発話タイミングが同調すること^[7]、演奏者の呼吸タイミングが同調すること^[8]も知られている。これらのことから、コミュニケーションにおけるタイミング共有は人間の基本的な能力であると考えられる。

このような人間のコミュニケーションにおけるタイ

ミング制御機構を解析するための実験系として、同期タッピング課題 (Synchronization Tapping Task) ^[9]がある。この課題は、音や光などで与えられる周期的な刺激とスイッチを押すタップ動作を同期させる課題である。Thautらは、刺激周期を時間的に変動させた実験により、刺激とタップの位相差およびタップ周期が刺激の周期変動に適応することを示した^[10]。また、Reppらは、刺激周期の変動幅を調整することで、その変動が実験参加者に認知された場合とされなかった場合で応答が異なることを示した^[11]。このような同期タッピング課題の結果を再現するモデルも複数提唱されている^[12-15]。我々の研究グループにおいても、注意資源を考慮した心理学的な側面からの解析や、時系列データ解析によるダイナミクスの推定、統計解析を用いた線形モデル推定などを行ってきた^[16-19]。

先行研究^[19]で推定されたタイミング制御モデルは、位相差が協調タップの運動を決定するモデルだった。しかし位相差は自己と他者とを分離できない量であり、この点において位相差は協調タッピングにおける低次の認知機構を反映した量であると考えられる。これに関し、協調タップを行う上で人間が認知しているものとして、その他にタップの周期が考えられる。タップ周期は自己の周期と他者の周期が明確に分けて認識されるという点で、位相差よりも高次の認知機構を反映し

た量であると考えることができる。

そこで本研究では、協調タッピングにおけるタイミング生成は、位相差のみならずお互いのタップの周期の影響を受ける、という仮説を立てる。そして、仮説の検証のために協調タッピングの実験系を構成し、タップの時系列データを測定する。その時系列データからタップの周期と位相差を計算し、それらの変数の関係性を分析する。最後に、この結果から線形モデル推定を行う。

2 実験方法

2.1 タスク

協調タッピング課題は 2 人の実験参加者から構成され、それぞれの実験参加者に対して、他方の実験参加者のタップのリズムにタイミングを揃えてボタン押し動作するように指示が与えられる。ただし、2 人のタップの初期状態を揃えるために、最初の 20 タップにおいては、実験参加者に伝えることなく周期 650ms の一定周期のリズム音刺激を両実験参加者に同時に提示した。タップ回数については、一定周期の 20 タップ後の 110 タップのデータを取得し、不安定な挙動を示す相互作用開始直後の 10 タップを除いた 100 タップ分を有効データとして解析に用いた。ボタン押し動作は右手人差し指で行なわせた。実験中はアイマスクを着用した上で瞑目し、ボタン押しに必要な右手人差し指以外の身体部位は動かしてはいけないという制限を与えた(図 1)。



図 1 実験環境

Fig.1 Experiment environment

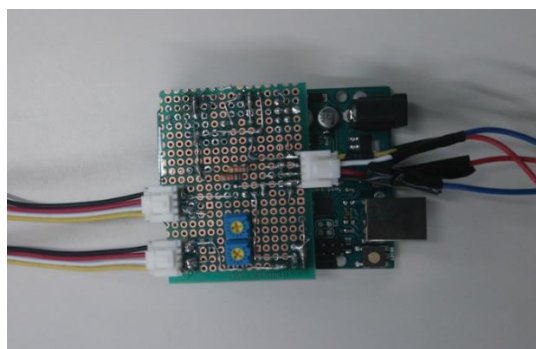


図 2 協調タッピング制御装置

Fig2. The control unit of cooperative tapping

音刺激を聞き取るに当たって障害はなかった。2 名を 1 組とし、合計 5 組のデータを収集した。実験環境としては、両実験参加者を背中向きに着座させ、刺激音を阻害する可能性のある雑音源（機械動作音、歩行音、通気音など）をできるだけ排除した状態で、さらに背景音としてホワイトノイズを提示した。

2.3 実験システム

本研究で開発した協調タッピング実験システムは 2 人の実験参加者が 1 組となって使用する。全体の構造としては、一方の実験参加者のボタン押し動作が、他方の実験参加者に音刺激として与えられるクロスフィードバック系として構成されている。この実験は Arduino Uno (Arduino Uno Rev3, Arduino SRL, Britain)によって制御される(図 2)。ボタン押し動作を検出するための圧力センサ(FSR-402, Interlink Electronics, Japan)は Arduino Uno と接続され、押下することでアナログピンに入力される電圧が下がる。電圧が閾値を下回ったときにデジタルピンの出力を変えることで音刺激を提示

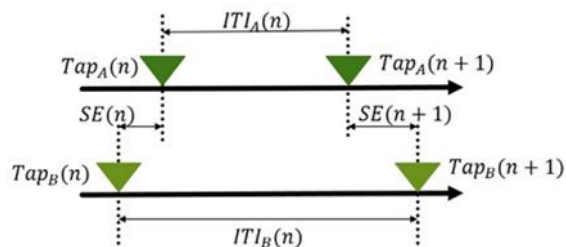


図 3 実験参加者のタップ間での時間的關係

Fig. 3 Temporal Relationship between Subjects' Taps

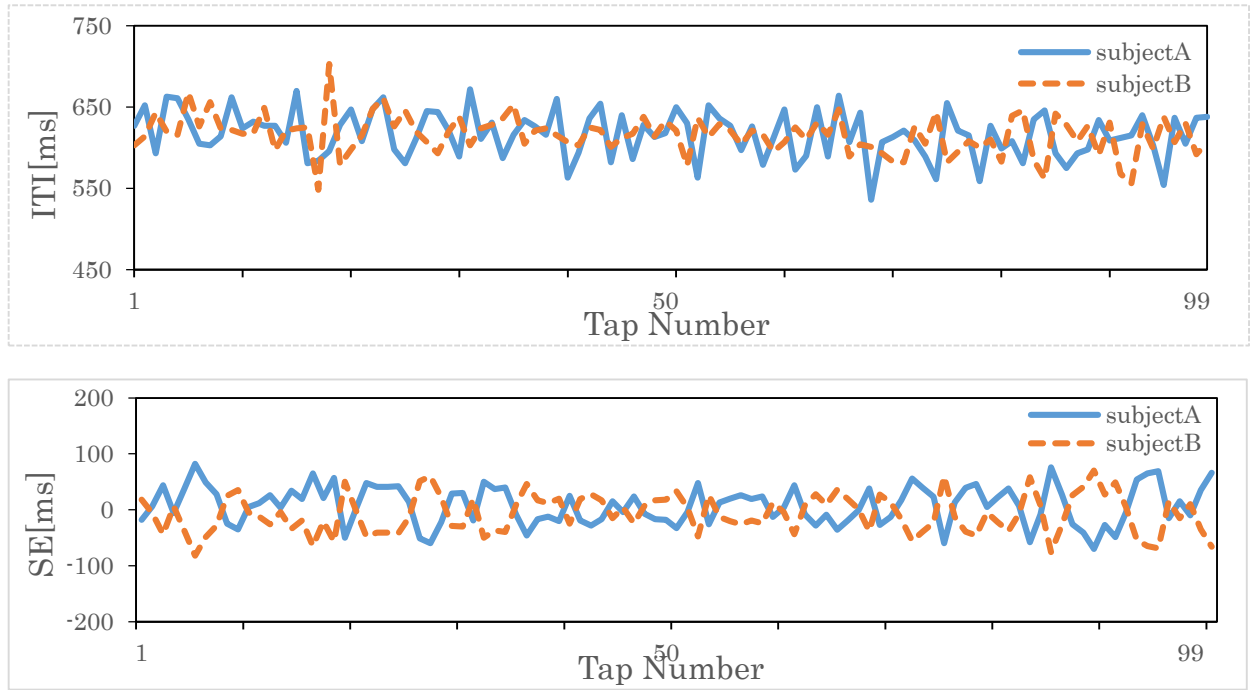


図 4 協調タッピングにおける非同期量(SE)とタップ周期(ITI)の時間発展

Fig. 4 Temporal Development of Synchronization Error (SE) and Inter Tap-onset Interval (ITI) in Cooperative Tapping

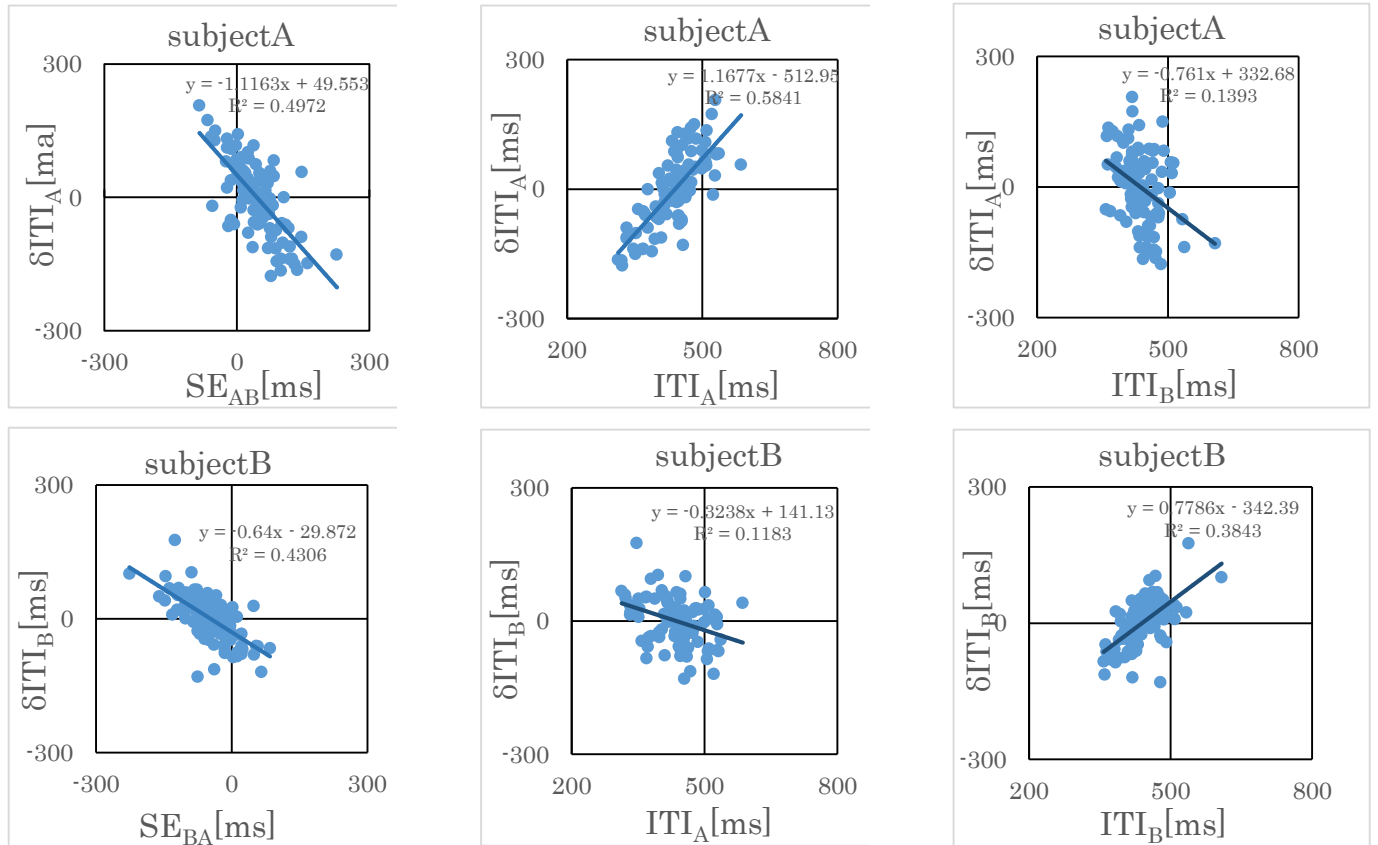


図 5 SE- δITI , 自己の ITI- δITI , 他者の ITI- δITI の散布図

Fig. 5 Scatter Plot of SE- δITI , self ITI- δITI , and anyother ITI- δITI

する. 音刺激は 500Hz 矩形波を 100ms の間, ヘッドフォン(MDR-1RBT, SONY, Japan)によって実験参加者の両耳に提示する. 実験データとして実験参加者のボタン押し時刻を時間分解能 1ms で記録する.

2.4 データ分析

記録された n 番目のボタン押し時刻を $Tap(n)$ として, 2 人の実験参加者間での非同期量(SE : synchronization Error)と個々の実験参加者のタップ周期(ITI : Inter Tap-onset Interval)を解析に用いる特徴量として次のように定義する(図 3):

$$SE_{AB}(n) = Tap_A(n) - Tap_B(n), \quad (1)$$

$$ITI_A(n) = Tap_A(n+1) - Tap_A(n). \quad (2)$$

このように, ITI は, 一方の実験参加者の Tap のみで定義されるが, SE は, 両実験参加者の Tap の時間差として定義される. そのため, 一方の実験参加者 SE と他方の実験参加者の SE は, $SE_A(n) = -SE_B(n)$ という正負が反転した関係にある.

3.実験結果

実験によって得られた SE と ITI の時間発展の一例を図 4 に示す. ここで ITI の時間発展に着目すると, 2 人の ITI がほぼ同調しており課題が達成されていることがわかる. なお, 実験データを統計解析する上で ADF(augmented Dickey-Fuller) 検定を用いた. それによりデータの定常性を確認し, 非定常であると判断されたデータは解析から除外した.

3.1 散布図による統計解析

ここで, SE と ITI に加え, ITI の変化量(δITI)を以下のように定義する:

$$\delta ITI_A(n) = ITI_A(n) - ITI_A(n-1). \quad (3)$$

図 4 に対応した試行により得た δITI と自身の ITI , δITI と他者の ITI , δITI と SE の散布図を図 5 に示す. δITI と自身の ITI には 1 次の線形近似直線が引けるような正の相関関係が, δITI と SE については 1 次の線形近似直線が引けるような負の相関関係が見られた. このような傾向はすべての実験参加者において見られた. また, δITI と他者の ITI についても 1 次の線形近似直線が引けるような負の相関関係が見られることがあった.

3.2 相互相関解析

このように, δITI と自身の ITI , δITI と他者の ITI , δITI

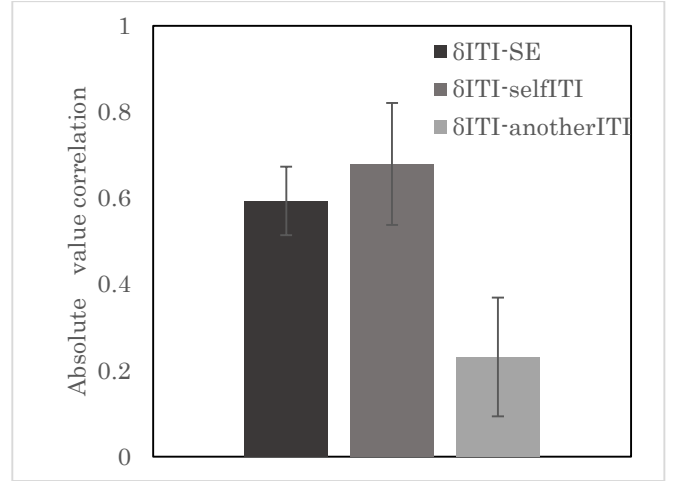


図 6 $SE-\delta ITI$, 自己の $ITI-\delta ITI$, 他者の $ITI-\delta ITI$ の相関の絶対値

Fig. 6 Absolute value correlation of $SE-\delta ITI$, self $ITI-\delta ITI$, and another $ITI-\delta ITI$

と SE との間に 1 次の線形近似直線で記述される相関関係が示唆された. そこで, 実際に相関解析を行い, 実験参加者全体としてどのような相関の傾向があるかを調べた. 具体的には, 3 つのパターン(δITI と自身の ITI , δITI と他者の ITI , δITI と SE)のそれぞれについて相互相関解析を行い, 相関係数の実験参加者平均を求めた. それぞれの相関の平均を絶対値を取り, 図 6 にまとめた.

4 モデル推定

4.1 モデル推定

前章の結果からモデル推定を行う. 具体的には, 各変数間の関係に線形性を仮定し, 解析を行う. ここで図 3 に引かれた線形直線に着目すると, 切片が存在することが見て取れる. これは ITI と SE が定常点近傍で振動していることを示している. そこで, それぞれの定常点を ITI_{PA} , ITI_{PB} , pss と置く. ここで ITI_{PA} , ITI_{PB} はパーソナルテンポ, pss は同時性判断の弁別点として導入した. さらに, 自己の ITI と他者の ITI は別の刺激として認知されるものであるから, 一般にこれらの運動への寄与率は異なるものと考えられる.

以上のことから, δITI と自身の ITI , δITI と他者の ITI , δITI と SE について以下の関係式が構成される:

$$\delta ITI_A(n) = \alpha_A(ITI_A(n-1) - ITI_{PA}), \quad (4)$$

$$\delta ITI_A(n) = \beta_A(ITI_B(n-1) - ITI_{PB}), \quad (5)$$

$$\delta ITI_A(n) = \gamma_A(SE_{AB}(n) - pss_A). \quad (6)$$

これらの関係式は、 $\delta ITI_B(n)$ についても同様に成り立つ。さらに、この 3 つの関係式が同時に成り立っていると仮定すると、最終的に次のモデルが導出される

$$\delta ITI_A(n) = \alpha_A(ITI_A(n-1) - ITI_{PA}) + \beta_A(ITI_B(n-1) - ITI_{PB}) + \gamma_A(SE_{AB}(n) - pss_A). \quad (7)$$

4.2 重回帰分析

前節で得られたモデルについて重回帰分析を行い、各項の標準係数を推定する。これによって、各要素の δITI への寄与率を計算し、そのメカニズムを推定する。重回帰分析する際に必要なそれぞれの定常点は、散布図の線形近似直線の切片より導出した。結果を以下に示す。

表 1 重回帰分析

Table 1 Multiple Linear Regression Analysis

Coefficient	α	β	γ
Average	0.574	-0.059	-0.345
SD	0.130	0.124	0.105

5.考察

本研究で得られた結果をまとめる。

- 協調タッピング課題において δITI と自身の ITI 、 δITI と他者の ITI 、 δITI と SE の間の相関分析を行った。その結果、 δITI と自身の ITI 、 δITI と SE については全ての試行で有意な相関が見られ、 δITI と他者の ITI についても有意な相関が見られる傾向があった。
- モデルに基づき得られたデータを当てはめ、各要素の δITI への寄与率を重回帰分析によって求めた。結果として自己の ITI の項の寄与率が、すべての被験者で大きかった。

本研究では協調タッピングにおけるタイミング生成は、位相差のみならずタップの周期の影響も受けるという仮説を立てた。そこで実際に協調タッピング実験を行いデータの解析をした結果、自身の ITI と他者の ITI が δITI に相関を持つことが判明し、仮説は立証された。

また、本研究では実験データから解析された関係式を用いてモデルを推定した。 ITI の定常点としてパーソナルテンポ、 SE の定常点として pss を導入したが、実

測のデータでも散布図に引かれた線形近似直線からも定常点の存在が見受けられた。しかし SE の定常点は、先行研究^[20,21]で示された pss よりも大きな値を示しており、 pss 以外の機構の影響も含まれていることが示唆される。

さらに重回帰分析で標準係数を導出した結果、すべての実験参加者において自身の ITI の項の運動への寄与率が最も大きいことが判明した。これはパーソナルテンポがタイミング生成において重要な役割を担っていることを示唆している。

寄与率の違いの原因として、観測の影響が挙げられる。実際のデータでは実験参加者によって各要素の寄与率が同じような値を取るという傾向が見られた。これは実験参加者ごとにタイミング生成における刺激の重要度を決定し、認知しているためであると推測される。注意資源を制御する実験によって、観測の影響を確認することが今後の研究として期待される。

参考文献

- [1] Miyake, Y.,: Interpersonal synchronization of body motion and the Walk-Mate walking support robot; IEEE Transactions on Robotics, **Vol.25**, No.3, pp.638-644 (2009)
- [2] Higo, H., Ogawa, K., Minemura, J., Xu, B., Nozawa, T., Ogata, T., Ara, K., Yano, K., Miyake, Y.,: Interpersonal similarity between body movements in face-to-face communication in daily life; PLoS ONE, **Vol.9**, Issue 7, pp.1-10(e102019) (2014)
- [3] Kwon, J., Ogawa, K., Miyake, Y.,: Detection of nonverbal synchronization through phase difference in human communications; PLoS ONE, (in press)
- [4] 三宅, 辰巳, 杉原: 交互発話における発話長と発話間隔の時間的階層性; 計測自動制御学会論文集, **Vol.40**, No.6, pp.670-677 (2004)
- [5] 菊池, 白井: 対話効率の向上を目的とした音声対話制御のモデル化; ヒューマンインタフェース学会論文誌, **Vol.2**, No.2, pp.145-152 (2000)
- [6] Richardson, M. J., et al.: Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination; Human movement science, **Vol.26**, Issue 6, pp.867-891

- (2007)
- [7] Condon, W. S., Ander L. W.: Neonate movement is synchronized with adult speech, *Science*, **Vol.183**, No.4120, pp.99-101 (1974)
- [8] 長岡, 小森, 中村: 練習が演奏者間の呼吸の一致に及ぼす効果;ピアノ連弾に関する事例的研究, 日本心理学会第 64 回大会発表論文集, p.603 (2000)
- [9] Dunlap K. : Reaction to rhythmic stimuli with attempt to synchronize; *Psychological Review*, **Vol.17**, No.6, pp.399-416 (1910)
- [10] Thaut M. H., Tian B., Azimi-Sadjadi M.R: Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment; *Human Movement Science*, **Vol.17**, Issue 6, pp.839-863 (1998)
- [11] Repp, B. H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization; *Human movement science* **Vol.20**, Issue 3, pp.277-312 (2001)
- [12] Hary D., Moore G.P: Synchronizing human movement with an external clock source; *Biological Cybernetics*, **Vol.56**, Issue 5-6, pp.305-311 (1987)
- [13] Haken H., et al :A theoretical model of phase transitions in human hand movements; *Biological Cybernetics*, **Vol.51**, Issue 5, pp.347-356 (1985)
- [14] Thaut M. H., Schaus L.M: Weakly-coupled oscillators in rhythmic motor synchronization; *Proceedings of the Society for Neuroscience*, Abstract #298, **Vol.20** (1997)
- [15] Vos, P. G., Helsen, E. L.: Tracking simple rhythms; On-beat versus off-beat performance; Springer Netherlands, **Vol.66**, pp.287-299 (1992).
- [16] 三宅, 大西, ペッペル: 同期タッピングにおける 2 つのタイミング予測機構; 計測自動制御学会論文集, **Vol.38**, No.12, pp.1114-1122 (2002)
- [17] Miyake Y., et al.: Two types of anticipation in synchronous tapping; *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **Vol.64**, pp.415-426 (2004)
- [18] 小松, 三宅: 同期タッピング課題における予測的挙動の時系列データ解析; 計測自動制御学会論文集, **Vol.39**, No.10, pp.415-426 (2004)
- [19] 今, 三宅: 協調タッピングにおける相互同調過程の解析とモデル化; ヒューマンインタフェース学会論文誌, **Vol.7**, no.4, pp.477-486 (2005)
- [20] Hao, Q., Ogata, T., Ogawa, K., Kwon, J., Miyake, Y., "The Temporal Simultaneous Perception of Auditory-tactile Stimuli in Voluntary Movements," *Frontiers in Psychology*, vol.6, 1429 (2015)
- [21] Davis, B., Christie, J., and Rorden, C.. Temporal order judgments activate temporal parietal junction. *J. Neurosci.*29, 3182-3188(2009)