

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*¹ 廣部 祐樹*¹ 三宅 美博*¹

Analysis of timing control mechanism and model of cooperative tapping

Takatoshi Nagao*¹, Yuki Hirobe*¹ and Yoshihiro Miyake*¹

Abstract – To develop the system to support human communication, we have to understand how cooperative behavior between humans is realized. For this purpose, we used cooperative tapping task as an example to find out the timing control mechanism in human cooperation. We measured temporal development of synchronization error (SE) and inter tap-onset interval (ITI) in mutual synchronization process of tapping, and found two types of strong relationship between them. Finally, the model of timing control of cooperative tapping was proposed based on the cross correlation analysis of SE and ITI.

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広く見られる、「間(ま)」の共有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、その際に現れる認知的な予測性や同時性を人工的に再現し、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。具体的には、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]。並んで椅子の上に座りそれ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言えるだろう。

人間のタイミング制御機構を解析するための実験系としては、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、その変動が被験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]。この同期タッピング課題についてのモデルも複数提唱されている^[12-15]。我々の研究グループでは、タイミング機構における人間の注意資源を考慮した心理学的側面の解析や、時系列データ解析によるダイナミクスの推定などで成果を上げてきた^[16-18]。

ただし同期タッピング課題そのものを見直すと、一定のリズムに一方向的に合わせるという実験系である。そのため、人間同士の協調作業で見られるタイミングの共有という、双方向的なタイミングの生成過程を測定することが難しいという問題が残されていた。

そこで本研究では、人間のコミュニケーションの基盤となる双方向的なタイミング共有過程を調べる最も単純な実験系として、協調タッピング課題(Cooperative Tapping Task)を構成する。そして、そこで得られたデータに基づき、協調タッピングにおけるタイミング制御モデルを提案することを目的とする。一見すると協調タッピング課題は一定テンポの音に合わせる場合に比べて難しそうに見える。しかし協調タッピングすることで同調しやすくなることも示唆されており^[19,20]、タイミングの生成過程を観察する上で有効な実験系であると考えられる。

このような協調タッピングのモデル化を進める上で、同期タッピング課題の実験的知見に基づき、協調タッピングにおけるタップ周期の変動は相手のタッピングとの位相差から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タップ周期と相手とのタップの位相差を測定し、それらの変量の間の関係性について分析する。さらに、その相互相関を調べることによって推測された変量の関係性から、協調タッピングにおけるタイミング制御モデルを推定することになる。

本論文では、第2章で実験方法について述べ、第3章では実験結果を示す。第4章では協調タッピングにおけるタイミング制御モデルを推定し、第5章でその妥当性について考察する。

*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

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

2. 実験方法

2.1 タスク

協調タッピング課題は2人の被験者から構成され、それぞれの被験者に対して、他方の被験者のタッピング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人のタッピングの初期状態を揃えるために、最初の20Tapにおいては、被験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被験者に同時に提示した。Tap回数については、一定周期の20Tap後の110Tap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10Tapを除いた100Tap分を有効データとして解析に用いた。また、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。

2.2 被験者

被験者は健康な20代の男性大学院生に有償で依頼した。いずれの被験者も、右利きで、提示される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、両被験者間をパーティションで仕切り、聴覚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、さらに背景音としてホワイトノイズを提示した。（図1）

2.3 実験システム

本研究で新たに開発した協調タッピング実験システムは2人の被験者が1組となって使用する。全体の構造としては、一方の被験者のボタン押し動作(Tap)が、他方の被験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)によって制御される。ボタン押し動作を検出するための圧力センサ(FSR-402, Interlink Electronics)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する。音刺激は500Hz矩形波を100msの間、ヘッドフォン(MDR-1RB, SONY)によって被験者の両耳に提示する。実験データとして被験者のボタン押し時刻を時間分解能1msで記録する。

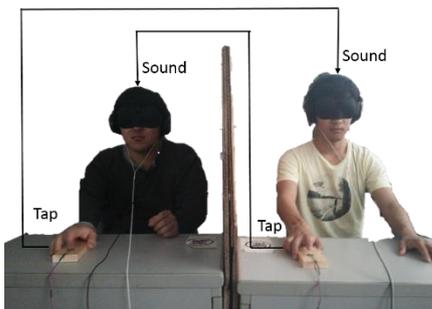


図1 協調タッピング実験システム
Fig. 1 Cooperative Tapping system

2.4 データ分析

記録された n 番目のボタン押し(Tap)時刻を $Tap(n)$ として、2人の被験者間での非同期量(SE: synchronization Error)と個々の被験者のタップ周期(ITI: Inter Tap-onset Interval)を計算し、解析に用いる特徴量とする。このとき非同期量(SE)とタップ周期(ITI)を、以下の式で定義する。（図2）

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

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

ITIは式(2)から、一方の被験者のTapのみで定義されるが、SEは式(1)より、両被験者のTapの時間差として定義される。そのため一方の被験者SEと他方の被験者のSEは、 $SE_A(n) = -SE_B(n)$ という正負が反転した関係にある。

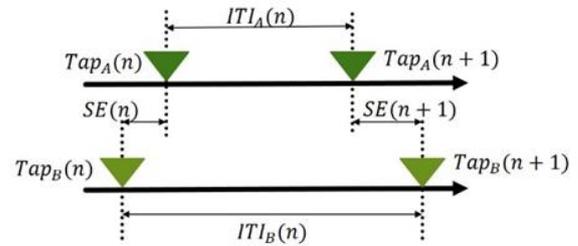


図2 被験者のタップ間での時間関係

Fig. 2 Temporal Relationship between Each Subject's Tap

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3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。さらに、SEの符号は常に一定ではなく被験者間で入れ替わっていることがわかる。これは被験者間にリーダーとフォロワーの関係が生成し、時間的に変化していることを表している。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。それによってデータの定常性を確認し、非定常であると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、SEの変化量(δSE)とITIの変化量(δITI)を以下のように定義する。

$$\delta SE_{AB}(n) = SE_{AB}(n) - SE_{AB}(n-1) \quad (3)$$

$$\delta ITI_A(n) = ITI_A(n) - ITI_A(n-1) \quad (4)$$

図3に対応した試行より得た δSE と ITI 、 SE と δITI 、 δSE と δITI の散布図を図4に示す。それぞれ1次の線形近似直線が引けるような負の比例関係が見られ、相関のあることが推測される。このような傾向は、すべての被験者において見られた。それぞれの R^2 値を比較すると、

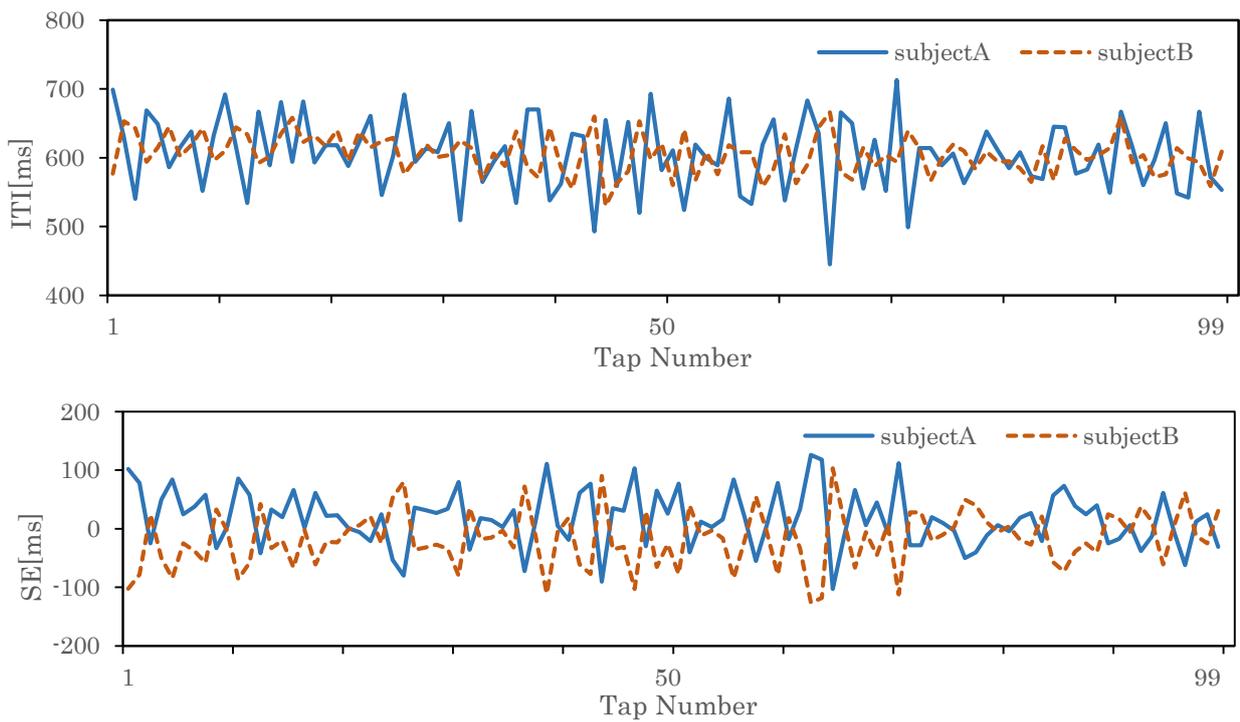


図3 協調タッピングにおける非同期量(SE)とタップ周期(ITI)の時間発展

Fig. 3 Temporal Development of Synchronization Error (SE) and Inter Tap-onset Interval (ITI) in Tapping with Human

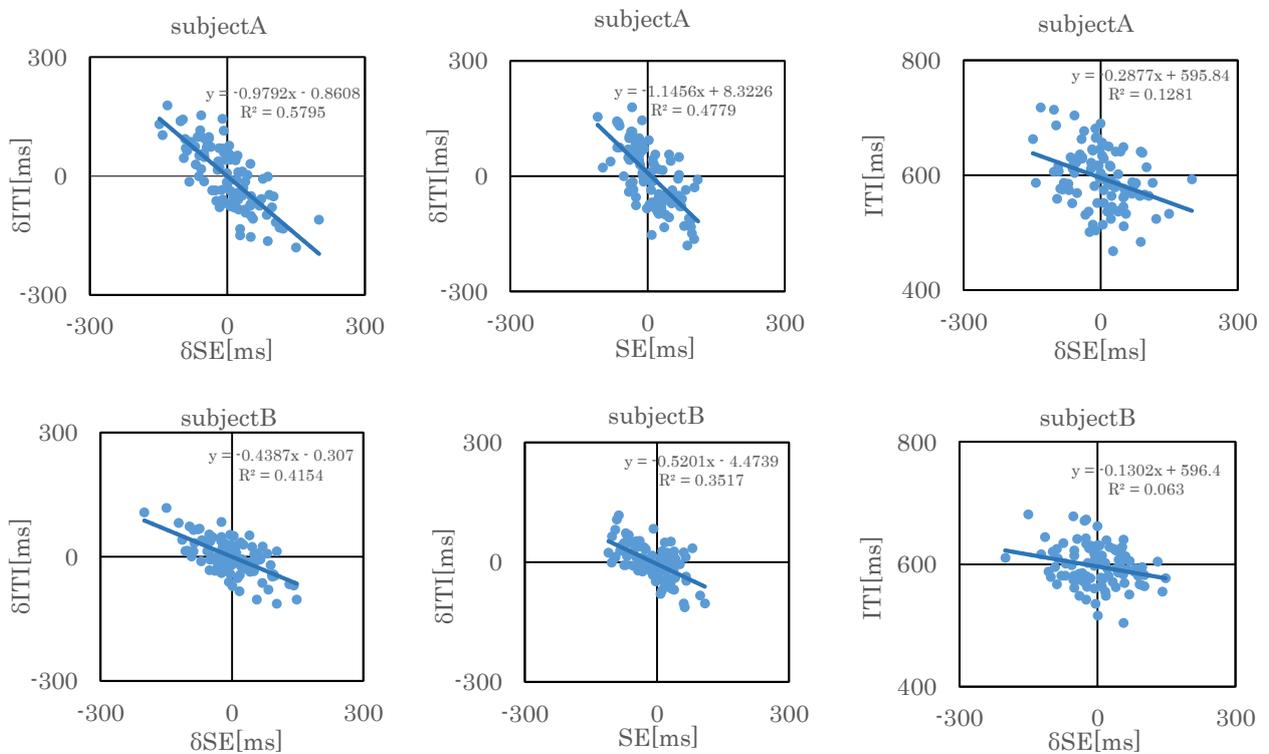


図4 $\delta SE-\delta ITI, \delta SE-ITI, ITI-\delta SE$ の散布図

Fig. 4 Scatter Plot of $SE-ITI, SE-\delta ITI,$ and $\delta SE-\delta ITI$

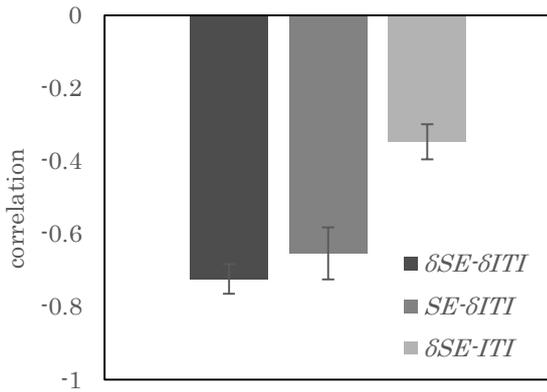


図5 SEとITIの相関係数

Fig. 5 Correlation Coefficient of SE and ITI

δSE と δITI の関係が最も高く、続いて SE と δITI 、 δSE と ITI という順番になっている。この順に相関係数も強いものと推測される。

3.2 相互相関解析

前節の散布図から SE と ITI に、相関係数が示唆された。この節では実際に相関解析を行い、被験者全体としてどのような相関の傾向があるかを調べる。散布図で得られたように、それぞれの3つのパターン(δSE と ITI 、 SE と δITI 、 δSE と δITI)について、相互相関解析を行い、相関係数の被験者平均を図5に示し、Lagごとの被験者平均を図6に示す。ここでLagは ITI をTap時刻の方向にずらした場合のLagである。ここで相関係数を信頼区間5%で t 検定した。その結果Lag=0における SE と δITI 、 δSE と δITI について有意な相関が観察された。

4. モデル推定

前章の結果からモデル推定を行う。有意な相関が見られたのは $SE - \delta ITI$ 、 $\delta SE - \delta ITI$ であることから、これらの2変数の関係には線形性があると考えられる。そこで本研究ではこれらの変数に比例関係があると仮定して解析する。以下の数式では、被験者を示す添字(A,B)を省略する。

4.1 $\delta SE - \delta ITI$ について

比例定数 k を用いてタップ周期の変化量 δITI と非同期量の変化量 δSE の関係は以下のように記述される。

$$\delta ITI(n) = k \cdot \delta SE(n) \quad (5)$$

この式を、タップ周期 ITI と非同期量 SE で展開すると次のようになる。

$$\begin{aligned} ITI(n) - ITI(n-1) &= k \cdot (SE(n) - SE(n-1)) \\ ITI(n) - k \cdot SE(n) &= ITI(n-1) - k \cdot SE(n-1) \end{aligned} \quad (6)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し、

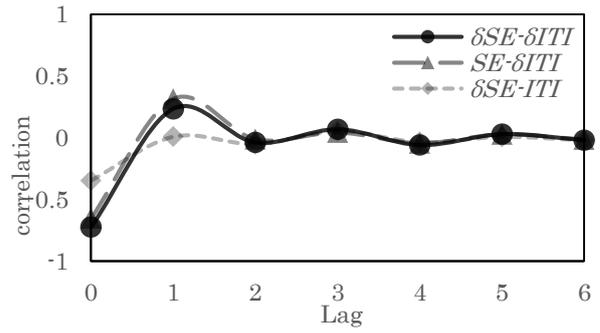


図6 SEとITIの相関係数

Fig. 6 Correlation Coefficient of SE and ITI

$$\begin{aligned} ITI(n) - k \cdot SE(n) &= ITI(n-1) - k \cdot SE(n-1) \\ &= ITI(n-2) - k \cdot SE(n-2) \\ &\vdots \\ &= ITI(0) - k \cdot SE(0) \end{aligned} \quad (7)$$

となり、この式が成立するためには、ある定数 C_1 を用いて、以下のように記述されればよい。

$$ITI(n) = C_1 + k \cdot SE(n) \quad (8)$$

このように、ある一定値 C_1 を中心として、タップ周期 ITI が SE と比例関係にあるモデルが得られる。

4.2 SEとdelta ITI

前節と同様に比例定数 h を用いてタップ周期の変化量 δITI と非同期量 SE の関係は以下のように記述される。

$$\delta ITI(n) = h \cdot SE(n) \quad (9)$$

δITI を ITI で展開して示すと、

$$ITI(n) - ITI(n-1) = h \cdot SE(n) \quad (10)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し、

$$\begin{aligned} ITI(n) &= ITI(n-1) + h \cdot SE(n) \\ &= ITI(n-2) + h \cdot (SE(n) + SE(n-1)) \\ &\vdots \\ &= ITI(0) + h \cdot (SE(n) + SE(n-1) + \dots + SE(1)) \end{aligned} \quad (11)$$

となる。この式が成立するために、ある定数 ITI_0 を用いて、以下のように記述されればよい。

$$ITI(n) = ITI_0 + h \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) \quad (12)$$

ここで得られたモデルは、過去の SE の総和によって、 ITI が影響を受けるモデルである。

4.3 モデルの係数推定

前章では2つのモデルを得ることができた。そこでこの2つのモデルが共存している場合を仮定し、モデルに含まれていた定数を実験式から重回帰分析によって推定する。 n 番目の ITI は、比例定数 t, l を用いて、以下のように計算される。

$$\begin{aligned} ITI(n) &= t(C_1 + k \cdot SE(n)) + l \left(ITI_0 + h \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) \right) \\ &= t \cdot k \cdot SE(n) + l \cdot h \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) + t \cdot C_1 + l \cdot ITI_0 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで SE の平均値、 \overline{SE} を用いて、

$$n \cdot \overline{SE} = \sum_{j=1}^n SE(j) \quad (14)$$

が成立する。 $SE(n)$ を x 、 \overline{SE} を y 、 $ITI(n)$ を z 、 $t \cdot k$ を a 、 $l \cdot h \cdot n$ を b 、 $t \cdot C_1 + l \cdot ITI_0$ を c とすると、

$$z = ax + by + c \quad (15)$$

と変形できる。2人の被験者で行った協調タッピングのデータから得られる x, y, z を元に式(15)に重回帰分析を行うことで、係数 a, b, c が決定される。重回帰分析を行う際、説明変数がそれぞれ独立である必要がある。2つの説明変数の相関係数を被験者で平均したところ、信頼区間5%の t 検定で有意ではないため x, y が独立であるとしている。

重回帰分析によって求められた係数 b はすべてのペアで、正負が反転した値で式(15)の第2項 by が負という関係で求められた。よって、係数 b については、絶対値の被験者平均で決定し、式(15)の第2項 by が負として算出されるように構成した。係数 a, c については、被験者平均によって求められた。得られた a, b, c の平均値と標準誤差を Table 1 に示す。

表1 重回帰分析

Table 1 Multiple Linear Regression Analysis

Coefficient	a	$ b $	c
Average	-0.45	0.88	602
SD	0.09	0.73	37

5. 考察

本研究で得られた結果をまとめる。

- 人間同士の協調プロセスにおけるタイミング共有のメカニズムを調べるための実験系として協調タッピング課題を構成した。

- 協調タッピング課題において δSE と ITI 、 SE と δITI 、 δSE と δITI の間の相関分析をそれぞれ行った。
- その結果、相関の強さは δSE と δITI 、 SE と δITI 、 δSE と ITI の順に大きくなった。検定を行ったところ δSE と δITI 、 SE と δITI はすべての被験者において有意な相関であった。一方で δSE と ITI は被験者によって有意である場合とそうでない場合があった。
- δSE と ITI 、 SE と δITI 、 δSE と δITI の相関においては時間方向の Lag が増えるにつれて相関が小さくなる傾向が見られた。
- 上記の相関解析に基づきモデル推定を行ったところ、 ITI が直前の SE から影響を受けるモデルと、 ITI が SE の履歴の総和から影響を受けるモデルの2種類が得られた。
- 2つのモデルが共存すると仮定し、人間同士の協調タッピングのデータから重回帰分析でモデル係数を推定し、タイミング制御モデルを得た。

まず、式(8)で示されるモデル(ITI が直前の SE から影響を受けるモデル)のダイナミクスについて考察する。このモデルは蔵本らによる位相振動子の相互引き込みモデル^[21]の線形近似と定性的に一致しており、タイミング制御機構上の類似性が予想される。重回帰分析で得られた係数 a に関しても、従来の知見^[11]と非常に近い値であり、この式(8)に対応するモデルの妥当性が支持される。これは我々が先に明らかにした同期タッピングにおける自動的タイミング機構^[16,17]と対応するものと思われる。

これに加え、式(12)で示されるモデル(ITI が SE の総和から影響を受けるモデル)は、初期 ITI に SE の履歴を加えることで、現在の ITI が求められるという記憶的過程と解釈でき、相互引き込みとは別の機構、つまり位相差の履歴性が影響することを示している。これは同期タッピング課題で明らかにされた、ワーキングメモリの関与する認知的タイミング機構^[16,17]と対応するものと予想される。ただし、人間が SE の全履歴を記憶しているとは考えにくく、この履歴性の高いダイナミクスの神経基盤を明らかにすることは今後の重要な課題の一つである。

今後の展開としては、タイミング制御機構の同調的側面だけでなく、非同調的側面についても考える必要がある。本研究では、時系列データが定常過程とみなして統計的に分析を進めた。そのため本論文で用いた統計的推定では、安定な定常過程のみがモデル化され、非定常な時間変動性成分や被験者の個体差はノイズとしてしか評価されないという本質的な限界があったのである。

しかし実際のデータでは、ADF 検定によって非定常と判断されたデータや、リーダーフォロワー関係が観測される事例も存在する。さらに実際のコミュニケーションにおいては、タイミングのズレを積極的に生成する逸脱のプロセスも重要な役割を担うことがある。スポーツにおけるフ

ェイントや漫才や落語のような話芸など、このような非定常性を積極的に利用する局面は多い。したがって将来的には定常過程から非定常過程へタイミング制御モデルを拡張することが必要である。そして、この限界を克服するためには、データの履歴性に注目してモデルのダイナミクスの自由度を上げる方法や、線形領域でのモデル推定を超えて非線形領域への拡張も求められるであろう。

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., Schause 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] Konvalinka, I, et al.: Follow you, follow me: continuous mutual prediction and adaptation in joint tapping; The Quarterly journal of experimental psychology, **Vol.63**, No.11, pp.2220-2230 (2010)
- [20] Skewes, J. C., et al.: Synchronised and complementary coordination mechanisms in an asymmetric joint aiming task; Experimental brain research, **Vol.233**, Issue 2, pp.551-565 (2015)
- [21] 蔵本: いわゆる「蔵本モデル」について; 応用数理, **Vol.17**, No.2, pp.175-177 (2007)