

# 交互協調タッピングの相互相関解析に基づくモデル化

○中島 壮人<sup>\*1</sup> 三宅 美博<sup>\*1</sup>

## Modeling of Alternate Cooperative Tapping based on Correlation Analysis

Masato Nakajima<sup>\*1</sup>, Yoshihiro Miyake<sup>\*1</sup>

**Abstract** – To improve cooperative process in Man-Machine interaction system, we have to investigate the cooperation mechanism between humans. In this study, using alternate cooperative tapping task, timing coordination mechanism in human cooperation was studied. We developed a cross feedback system between two humans in tapping, and measured the time series of tap onset. And calculating the temporal development of synchronization error (SE) and inter tap-onset interval (ITI), correlation between SE and ITI was clarified. Based on this correlation analysis, the model for timing control in alternate tapping was proposed.

**Keywords:** cooperative tapping, timing control, correlation analysis, human communication, duality

### 1. はじめに

人間は常に変化しつづける動的環境に適応しつつ生活している。そして適応の時間的な側面に深く関係しているのが、タイミングを合わせる能力である。この人間のタイミング機構の研究に古くから用いられてきたものとして、同期タッピング課題がある。

同期タッピング課題<sup>[1-3]</sup>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りタイミング制御モデルも複数提唱されている<sup>[4-7]</sup>。我々の研究グループでも、注意資源の影響を考慮した認知心理学的側面からの解明<sup>[8,9]</sup>や、時系列データ解析によるダイナミクスの推定<sup>[10]</sup>など、人間のタイミング制御に関連する様々な知見を明らかにしてきた。しかし、この同期タッピング課題で用いられているのは、人間がリズム音に一方的に合わせるという状況である。そのため、スポーツ競技や協調作業で見られる人間同士のタイミング合わせという、双方向的な局面を測定することができないという問題が残されていた。

このような問題を踏まえて、我々は人間同士のタイミング合わせを調べる実験系として、協調タッピング課題<sup>[11]</sup>に注目してきた。この協調タッピング課題は大きく2種類に分類でき、1つは同期協調タッピングであり、もう1つは交互協調タッピングである。同期協調タッピング課題は、2人の被験者が、自己のタップ動作を他方の被験者に音刺激として伝え、相互のタップを同期させる課題である。交互協調タッピング課題は、タップのタイミングを半周期ずらして交互にタップさせる課題である。既に、我々は、同期協調タッピング課題において、相関

解析によるモデルの推定や、それを基にした人間-機械系の再構築など、人間同士の双方向的なタイミング制御機構の解明に成果を上げている<sup>[11]</sup>。ところが交互協調タッピング課題については、まだそのメカニズムが明らかではない。そこで本研究では交互協調タッピング課題に注目し、タイミング機構を解明することをめざす。

一方、タイミング機構そのものとしては、同期タッピング課題の“Negative Asynchrony(負の非同期)”現象<sup>[12-14]</sup>に注目し、二重課題法を用いた実験から、タイミング機構が身体的過程と認知的過程として二重化されていることが示されている<sup>[8,9]</sup>。これは時系列解析によるダイナミクスの推定によっても裏付けられている<sup>[10]</sup>。さらに、同期協調タッピング課題ではリアルタイム的な相互作用と履歴性のある相互作用の二重化された機構でタイミング同期がなされていることも示されており<sup>[11]</sup>、これが上記の二重化されたタイミング機構と関連していることも示唆されている。

以上より、本研究では交互協調タッピング課題を対象として、そのタイミング制御機構を明らかにすることを目標とする。特に、二重化されたタイミング機構との関連から制御メカニズムの解析を進める。さらに時系列データ解析を踏まえて、交互タッピング課題におけるモデル推定も行なう。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験課題

交互協調タッピング課題は2人の被験者により実施される。一方の被験者のタップを音刺激として他方の被験者に伝達することで交互タッピングを実現するものである。その詳細は以下のようになっている。

\*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

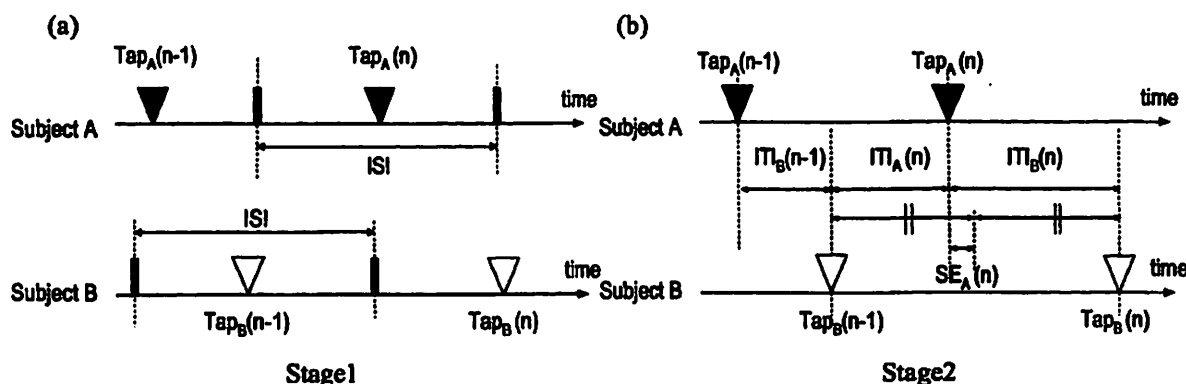


Fig.1 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap

実験開始直後の10Tap分はお互いのタップ音は聞こえず、一定周期の音刺激を与え、その音刺激と交互タッピングする条件である。これを Stage1 とする。その後11Tap目から、一定周期の音刺激は聞こえなくなり、被験者相互のタップ音が聞こえるようになる。被験者には、他方の被験者の連続するタップ間隔のちょうど中間にタップするように指示を与えた。つまり2人の被験者は交互にタップをすることになる。これを Stage2 とする。前半の Stage1 と後半の Stage2 をあわせて1つの試行とする。ボタン押し動作は右手人差し指で行ってもらった。実験中は瞑目し、右手人差し指以外の体の部位を使ってリズムをとることは禁止した。

## 2.2 特徴量

Stage1 における特徴量を Fig.1a に、Stage2 における特徴量を Fig.1b に示す。Stage1 における音刺激の一定の周期が ISI (Inter Stimulus-onset Interval) である。この刺激提示のタイミングは被験者 A と B で完全に逆位相となっている。これによって交互タッピングの周期を制御することになる。

Stage2 においては、被験者の n 番目の Tap 時刻を  $Tap(n)$  とする。このとき、タップ周期 (ITI: Inter Tap-onset Interval) と非同期量 (SE: Synchronization Error) を、Stage2 を解析する上で用いるパラメータとする。非同期量 (SE) とタップ周期 (ITI) を以下の式で定義する。

$$SE_A(n) = Tap_A(n) - \frac{Tap_B(n) + Tap_B(n-1)}{2} \quad (1)$$

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

SE は一方の被験者の連続する Tap の中間時刻が、他方の被験者の Tap とどれだけ離れているかを示す値である。ちょうど中間時刻で Tap すれば 0 となり、2人の被験者が完全な逆位相で交互タッピングできていることになる。それより早ければ負の値、遅ければ正の値となる。

ITI は、相手の Tap から自分の Tap までの時間として定義される。よって ITI は ISI の約 1/2 倍になる。

## 2.3 被験者・実験環境

被験者は、健康な 20 代の男性 3 名にボランティアで依頼した。2 名を 1 組とし、全組み合わせとして合計 3 組のデータを収集した。被験者はいずれも右利きで、提示される音刺激を聞き取るにあたって聴覚的障害はなかった。

実験環境として、聴覚刺激を阻害する可能性のある雑音源 (機械動作音、歩行者、通風音など) をできるだけ排除した静かな環境を用意した。

## 2.4 システム概要

本研究で製作した交互タッピング実験系は、Fig.2 のように、2 人の被験者が 1 組になって使用するものである。全体としては、自己のタップが他方の被験者に音刺激として与えられる系として構成されている。両者のタップ時刻はパラレルポートを介して、シングルタスク OS (IBM, PC-DOS2000) にて駆動される PC (IBM, ThinkPad535) の RTC と RS-232C を用いて、1/1024s の時間精度で記録される。また、音刺激は、500Hz 矩形波を 100ms 間 (タイマ IC, NE555)、カップ型ヘッドフォンによって被験者の両耳に提示する。

## 2.5 実験手順

上記のように、個々の試行は前半の Stage1 と後半の Stage2 から構成され、SE と ITI の時間発展が記録される。これに基づいて両者の相互相関が解析される。ただし、これは刺激周期 ISI に依存することが予想されるため、Stage1 の ISI を 5 種類 (500ms, 1000ms, 2000ms, 3000ms, 4000ms) に変化させ、5 試行で 1 セッションとする。このとき各試行において、被験者には 130 回タップしてもらい、ISI を固定する Stage1 の 10Tap とその直後の 10Tap、最後の 10Tap を除いた 100Tap を有効データとして解析に用いる。

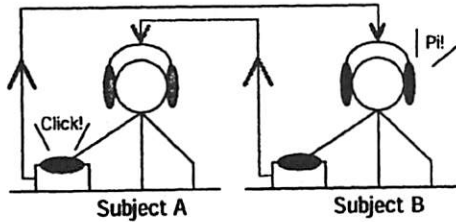


Fig.2 Cross-Feedback tapping system

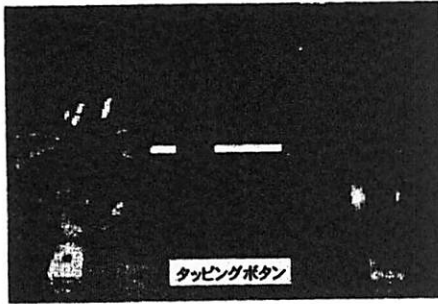


Fig.3 Equipment of alternate tapping system

### 3. 実験結果

#### 3.1 SE と ITI の時間発展

Stage2 において得られた SE と ITI の時間発展の例を Fig.4 に示す。いずれの ISI においても、2 人の ITI がほぼ同じ時間長で安定に推移しており、2 人のタッピングが同調していることがわかる。SE については、被験者間で位相が反転する傾向が見て取れる。また、ISI が増加するに従い SE と ITI のゆらぎの幅が大きくなっていることがわかる。

#### 3.2 SE と ITI の散布図

このとき SE と ITI の時間発展の仕組みとして、被験者が自分側のタッピングが早すぎたと感じた場合、次のタップを遅らせようとすると考えられ、SE と ITI には負の相関があることが予想される。そこで、SE と ITI の関係および SE と ITI の変化量 (ITI<sub>v</sub>) の関係について相関を調べる。このとき ITI<sub>v</sub> は以下のように定義した。

$$ITI_v(n) = ITI(n) - ITI(n-1) \quad (3)$$

1 試行より得た SE と ITI、SE と ITI<sub>v</sub> の散布図を Fig.5 に示す。それぞれ右下がりの線形近似直線が引けるような分布であり、強い負の相関があることを意味している。また、R<sup>2</sup> 値を ISI 毎に比較すると、ISI が大きくなるにつれて SE-ITI の R<sup>2</sup> 値が小さくなる一方で、SE-ITI<sub>v</sub> の R<sup>2</sup> 値が大きくなっている。相互相関にもこの関係があると推測される。

### 3.3 相互相関解析

前節の散布図の結果から SE と ITI の間に相関関係があること、その関係が ISI 毎に変動しているであろうことが示唆された。そこで、本節では実際に相互相関解析を行い、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。

前節の散布図において顕著な相関が見られた 2 つの関係、SE と ITI、SE と ITI<sub>v</sub> について相互相関解析を行なった。結果を、Fig.6 のように、Lag=0 における相関係数の被験者間平均として ISI 毎に示す。この図から明らかのように、全ての ISI において SE と ITI の相関の方が、SE と ITI<sub>v</sub> の相関よりも負側に強く現れている。ただし、ISI が大きくなるにつれて SE-ITI の相関係数が徐々に減少し、SE-ITI<sub>v</sub> の相関係数が徐々に増加していることもわかる。このことは 2 種類の相関関係の大小関係が ISI に依存して変化することを示している。

### 4. モデル推定

前章の相互相関解析より、強い相関が見られた SE と ITI、SE と ITI<sub>v</sub> で得られた結果を元に、交互協調タッピングのモデル推定を行う。

#### 4.1 SE と ITI

SE と ITI の間には強い負の相関があることから、ある定数 C<sub>1</sub> と比例定数 k を用いて、タップ周期 ITI と同期誤差 SE は以下のように記述される。

$$ITI(n) = C_1 + k \cdot SE(n) \quad (4)$$

このように、タップ周期 ITI が、SE と比例関係にあるリアルタイム性の高いモデルが得られた。

#### 4.2 SE と ITI<sub>v</sub>

前節と同様に、SE と ITI<sub>v</sub> の間にも相関があることから、比例定数 h を用いてタップ周期の変化量 ITI<sub>v</sub> と同期誤差 SE は以下のように記述される。

$$ITI_v = h \cdot SE(n) \quad (5)$$

ITI<sub>v</sub> を ITI で展開して示すと、

$$ITI(n) - ITI(n-1) = h \cdot SE(n) \quad (6)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し、

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

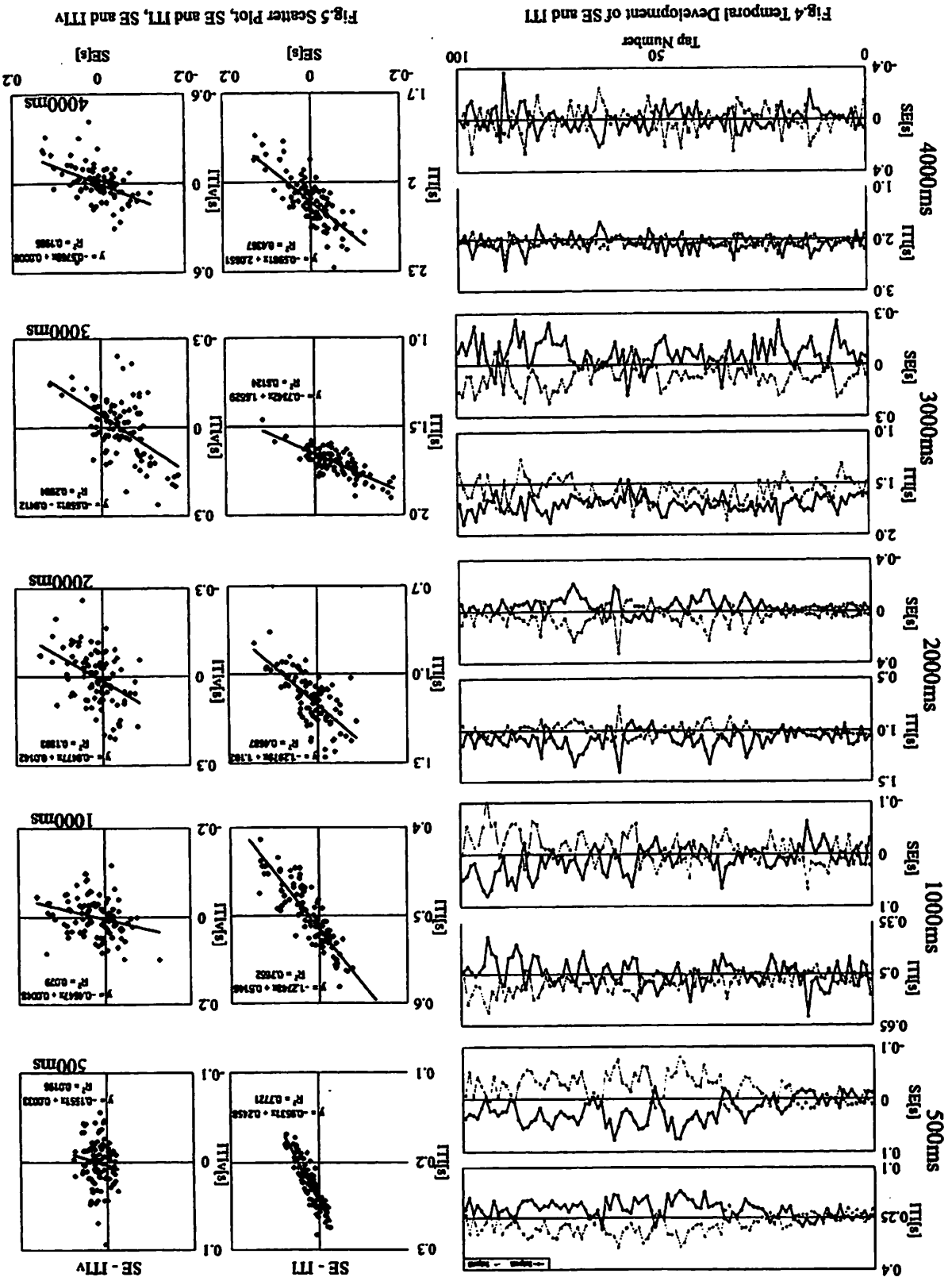


Fig.5 Scatter Plot, SE and ITI, SE and ITIV

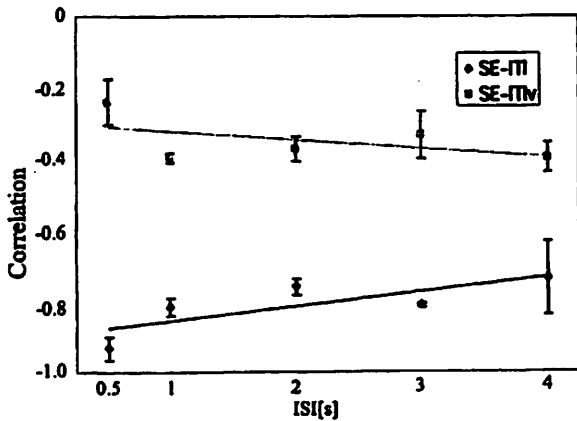


Fig.6 Correlation Coefficient of SE and ITI in each ISI

となり、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。

$$ITI(n) = ITI_0 + h \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) \quad (8)$$

ここで得られたモデルは、過去の SE の総和によって ITI が影響を受ける履歴性の高いモデルである。

#### 4.3 交互協調タッピングのモデル

4.1 節と 4.2 節において得られた 2 つのモデルを、交互協調タッピングにおけるタイミング制御の主要因子とし、それらが線形加算できるものと仮定すれば、以下の様なモデルが推定される。このとき  $n$  番目の ITI は比例定数  $l$  を用いて次のように表せる。

$$\begin{aligned} ITI(n) &= t(C_1 + k \cdot SE(n)) + l(ITI_0 + h \cdot \sum_{j=1}^n SE(j)) \quad (9) \\ &= t \cdot k \cdot SE(n) + l \cdot h \sum_{j=1}^n SE(j) + t \cdot C_1 + l \cdot ITI_0 \end{aligned}$$

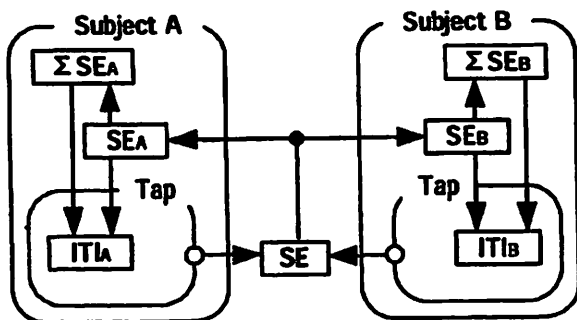


Fig.7 Framework of alternate tapping task

このときモデルのブロック図を Fig.7 に示す。ITI、SE、 $\Sigma SE$  が全て独立であると考え、重回帰分析によってモデルの係数を決定することができる。

#### 5. 考察

今回の実験によって得られた結果をまとめる。

- 交互協調タッピング課題を行い、そのタップの時間発展を計測することに成功した。
- SE と ITI、SE と ITI<sub>v</sub> の間には、それぞれ強い相関が観察された。
- ISI が増加するにつれて、SE と ITI は相関値が減少し、SE と ITI<sub>v</sub> は相関値が増加する傾向がみられた。
- 相関解析を元にモデル推定を行ったところ、ITI が直前の SE に影響を受けるモデルと、累積された SE の総和に影響を受けるモデルが得られた。

交互協調タッピングにおいても、SE と ITI および SE と ITI<sub>v</sub> の間に強い相関が観察され、同期協調タッピング課題で報告されている二重化されたタイミング機構<sup>[11]</sup>と同様のタイミング制御機構の存在が示された。さらに、本研究ではタイミング機構への ISI の依存性についても初めて明らかにされた。ISI が増加するにつれて、SE と ITI は相関値が減少し、SE と ITI<sub>v</sub> は相関値が増加する傾向がみられたのである。このことはモデル推定を通して解釈すると、ISI が増加するにつれてタイミング制御における直前の SE からの影響が減少し、SE の過去の総和からの影響が増加していることになる。つまり、ISI の増加に伴い、タイミング機構におけるリアルタイム性が弱くなり、履歴性が強くなるということである。ISI が 1000ms よりも短い領域では小脳が、それよりも長い ISI 領域では前頭前野が、タイミング機構において重要な役割を果たしているという報告もあり、今回の実験結果との関連が予想される。

#### 6. まとめ

本研究では、人間同士の双方向的なタイミング制御機構を調べるために交互協調タッピング課題を行った。そして相関解析に基づいて交互協調タッピングのモデルを提案した。特に、その構造が同期協調タッピング実験と同じ二重化された構造であることが示された。さらに、双方向的なタイミング機構における周期依存性を初めて観察することに成功し、同期タッピング課題において既に報告されていた刺激周期依存性に対応する知見を明らかにした。

本研究で構成した交互タッピング課題は、非常に限定された状況における人間同士のタイミング共有を調べる

実験系である。しかしテニスなどのスポーツや会話のやりとりなど、人間同士が交互にタイミングをとる状況は広く観察され、それらの基本的なプロセスのモデル系と見做すことが可能である。したがって、これは今後のコミュニケーション技術の基盤技術につながる可能性を内包するものであろう。今後は、提案したモデルを元に、交互タッピング実験を人間-機械系において再構成し妥当性を検証すると共に、本モデルを用いて様々な人間のコミュニケーションを解析することに取り組みたい。

#### 参考文献

- [1] L.T.Stevens: On the time sense, *Mind*, 11, 393/ 404 (1989).
- [2] P.Fraisse: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin (Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/ 257 (1966).
- [3] G. Aschersleben and W. Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, 57- 3, 305/ 317 (1995).
- [4] Hary, D., Moore, G.P.: Synchronizing human movement with an external clock source. *Biological cybernetics*, 56, 305/ 311 (1987)
- [5] Haken, H., Kelso, J.A., Bunz, H.: A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51-5,347/ 356(1985)
- [6] Thaut M.H., Schause, L.M.: Weakly-coupled oscillators in rhythmic motor synchronization, *Proceedings of the Society for Neuroscience*, 298, 20 (Abstract) (1997)
- [7] Vos P.G, Helsen E.L.: Tracking simple rhythms: On-beat versus off-beat performance. In F. Macar and V. Outhas(Eds), *Proceedings of NATO advanced research workshop on time, action and cognition*, 287/299, Dordrecht N.L., Kluwer Academic Publishers (1992)
- [8] Miyake, Y., Onishi, Y. & Poeppel, E., "Two types of anticipation in synchronous tapping," *Acta Neurobiologicae Experimentalis*, vol.64, pp.415-426 (2004)
- [9] 三宅, 大西, ベッペル: 同期タッピングにおける 2 種類のタイミング予測, *計測自動制御学会論文集*, 38- 12, 1114/ 1122 (2002).
- [10] 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- 10,952/ 960 (2003).
- [11] 今, 三宅: 協調タッピングにおける相互相関解析に基づいたモデルの提案, 第 17 回自律分散システム・シンポジウム資料, 213-216 (2005)
- [12] Stevens L.T.: On the time sense, *Mind*, 11, 393/ 404, (1886)
- [13] Fraisse P.: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin (ed), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/ 257 (1996)
- [14] Aschersleben G, Prinz W.: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, 57-3, 305/ 317
- [15] J. Mates, T. Radil, U. Müller and E. Pöppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6- 4, 332/ 340 (1994).