

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

○今 誉^{*1} 小松 知章^{*1} 三宅 美博^{*1}

A model of cooperative tapping based on correlation analysis

Homare Kon^{*1}, Tomoaki Komatsu^{*1} and Yoshihiro Miyake^{*1}

Abstract –To improve cooperative process in Human-Machine system, we have to see how cooperative process between human. We used co-operative tapping task to find out timing control mechanism in cooperative process between two human. We made an experiment that has Cross-Feedback system, measured tap onset times, calculated synchronization error (SE) and inter tap-onset interval (ITI). The model was presumed based on correlation analysis of SE and ITI.

Keywords: cooperative tapping, cooperative process, timing control, synchronization, tapping task

1. はじめに

我々は常に変化しつづける外界に対応して生活している。タイミング合わせはその時間的な対応である。タイミング合わせの重要性は、様々なスポーツ等の例^[1]を鑑みても明らかである。

自己と外界のタイミング合わせの研究に用いられる実験手法に同期タッピング課題がある^{[2][3][4]}。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。人間のタイミング制御機構の研究に用いられており、人間の注意資源^{[5][6]}を考慮した生理学的な側面の解明や、時系列データ解析^[7]によるダイナミクスの推定など、人間のタイミング合わせについて様々な成果を上げてきた。

しかし、この同期タッピング課題で用いられているのは、人間が機械に一方的に合わせるという実験系である。そのため、本来の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、双方向的な側面を測定することができない。

本研究では、本来ある人間の身体的コミュニケーション^[8]の基礎となる双方向的なタイミング合わせを調べる実験系として、協調タッピングシステムを構成する。そこで得られたデータの解析結果を元に協調タッピングにおけるモデルを推定することを目的とする。

2. 協調タッピング

2.1 システム概要

本研究で製作した協調タッピングシステムは (Fig. 1) は、2 人の被験者を 1 組として使用する。自己のボタン押し動作 (Tap) が、自身ではなく、他方の被験者に音刺

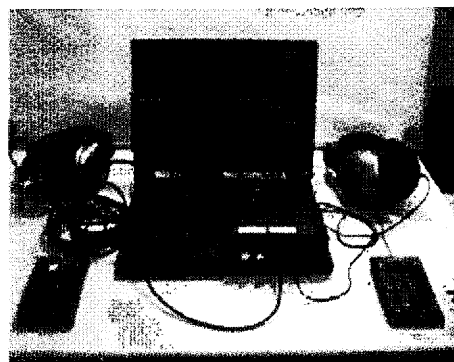


Fig. 1 Equipment of cooperative tapping system

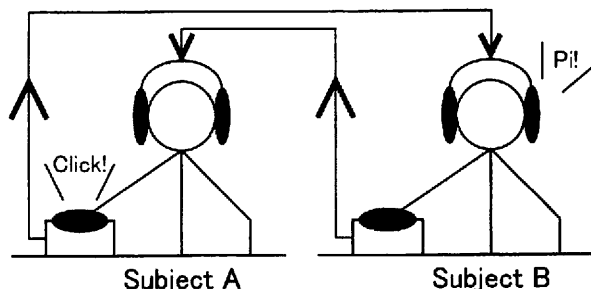


Fig. 2 Cross-Feedback tapping system

激として与えられるクロスフィードバック系を構成している (Fig. 2)。両者の Tap 時刻は、シングルタスク OS (PC-DOS2000) にて駆動される PC の RTC と RS-232C を用いることで、1/1024sec の時間精度で記録される。提示音刺激は、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。

2.2 特徴量

記録された n 番目のボタン押し (Tap) 時刻を Tap(n) として、相手との非同期量 (SE) と自己のタップ周期 (ITI) を解析に用いる特徴量とする (Fig. 3)。非同期量 (SE)

*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

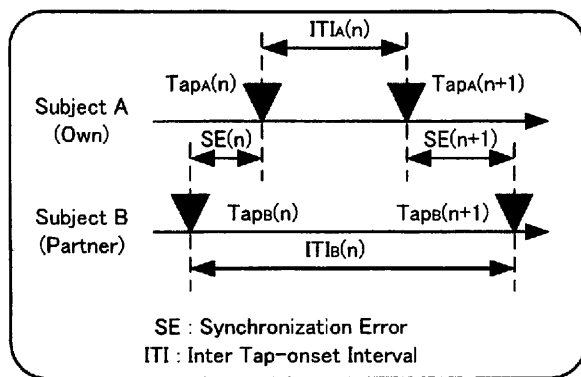


Fig. 3 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap

と、タップ周期 (ITI) を、以下の式で定義する。

$$SE_A(n) = Tap_A(n) - Tap_B(n) \quad (1)$$

$$ITI(n) = Tap(n+1) - Tap(n) \quad (2)$$

ITI は式(1)から、自己 (一方の被験者) の Tap のみにより定義されるが、SE は式(2)より、自他両者の Tap から定義される。そのため、自己の SE と他者の SE は、 $SE_A = -SE_B$ という正負が反転した関係にある。

2.3 タスク

主観的に 1~2sec の Tap 周期で、他方の被験者とできる限り Tap を同期するように課題を与えた。先に定義した特長量で言い換えると、主観上で、ITI が 1~2sec の範囲で SE を 0sec にすることを目的とするような課題を与えたということになる。そして、データは実時間上の ITI, SE で記録した。

ボタン押し動作は、右手人差指で行われた。実験中は瞑目し、ボタン押しに必要な右手人差指以外の体は動かしてはいけないという制限を与えた。

Tap 回数については、試行開始直後の不安定データを除いた、100Tap 分の有効データを得るのに十分な回数 Tap させた。

2.4 被験者・実験環境

課題を遂行する被験者は、健常な大学院生 3 名にボランティアで依頼した。2 名を 1 組とし、合計 3 組のデータを収集した。被験者とも、提示される音刺激を聞き取るにあたって障害はなかった。

実験環境として、聴覚刺激音を阻害する可能性のある要因の雑音源(機械動作音, 歩行音, 通風音など)は知覚されないようにできるだけ排除した環境を用意した。

3. 実験結果

3.1 タップ周期

ある被験者ペアのタップ周期 (ITI) の時系列データの典型例を Fig. 4 に示す。試行全長に渡り ITI は振動し、2 拍周期で増減を繰り返している。また、被験者間において、位相が反転しているのが見てとれる。

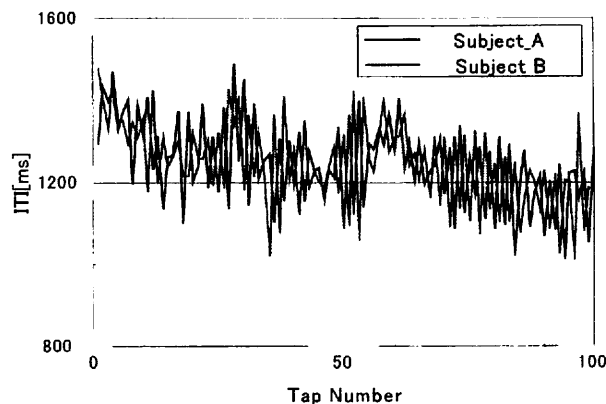


Fig. 4 Raw time series data of pair of subject's ITI

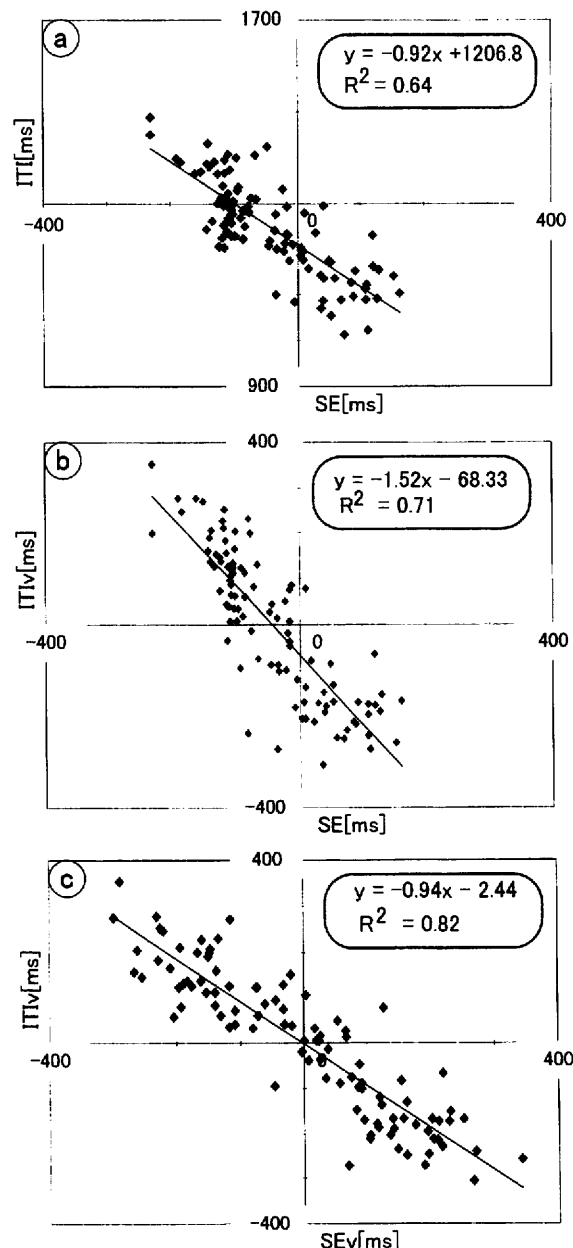


Fig. 5 Scatter plot, a shows between SE and ITI, b shows between SE and ITIv, c shows between SEv and ITIv.

3.2 SE と ITI の散布図

SE の変化量 (SEv) と ITI の変化量 (ITiv) を以下のように定義する.

$$\begin{aligned} SE_v(n) &= SE(n) - SE(n-1) \\ ITiv(n) &= ITI(n) - ITI(n-1) \end{aligned} \quad (3)$$

1 試行より得た SE と ITI, SE と ITiv, SEv と ITiv の散布図を示す (Fig. 5). それぞれ, 負の比例関係が見られ, 相関があるということが推測される. このような傾向は, すべての被験者において見られた.

4. 相互相関解析

4.1 タップ周期 (ITI) の相関解析

1 組ずつの被験者間より得たタップ周期 (ITI) の相互相関, その試行間平均を Fig. 6 に示す. 強い相関 (相関係数 $c(1)=0.56$ 程度) を示すことと, 2 拍周期で変動していることがわかる. これにより, ITI は他方の直前 ITI に強く影響を受けていることがわかる.

4.2 SE と ITI の相関解析

散布図で得られたように, それぞれの 3 つのパターン (SE と ITI, SE と ITiv, SEv と ITiv) について, 相互相関解析を行い, その被験者間平均を示す (Fig. 7).

各々については Lag1 で最大値を取っていることがわかり, 直前の SE, SEv が ITI や ITI の変化量に作用していることがわかる. SE と ITiv で相関係数 $c(1)=0.59$, SEv と ITiv で相関係数 $c(1)=0.80$ 程度と, 非常に強い相関があることが示された.

5. モデル提案

前章の相互相関解析より, 強い相関が見られた SE と ITiv, SEv と ITiv で得られた結果を元に, モデル推定を行う.

5.1 ITiv と SEv

比例定数 k を用いてタップ周期の変化量 ITiv と同期誤差の変化量 SEv は以下のように記述される.

$$ITiv(n) = k \cdot SEv(n) \quad (4)$$

これを, タップ周期 ITI と, 同期誤差 SE で展開して示すと,

$$\begin{aligned} ITI(n) - ITI(n-1) &= k \cdot (SE(n) - SE(n-1)) \\ ITI(n) - k \cdot SE(n) &= ITI(n-1) - k \cdot SE(n-1) \end{aligned} \quad (5)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し,

$$\begin{aligned} ITI(n) - k \cdot SE(n) &= ITI(n-1) - k \cdot SE(n-1) \\ &= ITI(n-2) - k \cdot SE(n-2) \\ &\vdots \\ &= ITI(0) - k \cdot SE(0) \end{aligned} \quad (6)$$

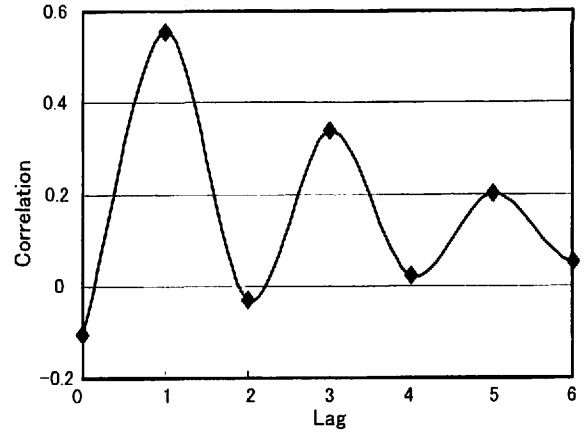


Fig. 6 Correlation coefficient between pair of subject's ITI

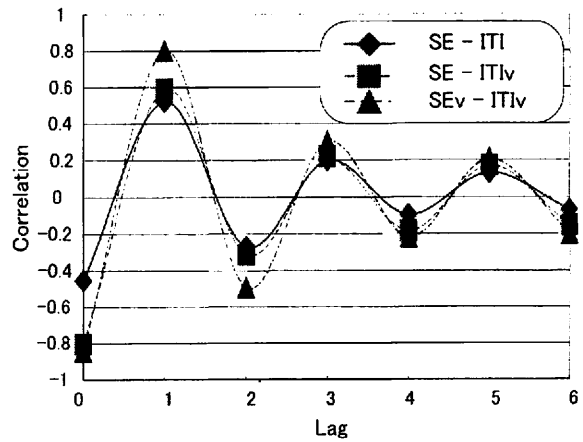


Fig. 7 Correlation coefficient between SE and ITI

となり, この式が成立するためには, ある定数 a を用いて, 以下のように示されればよい.

$$ITI(n) = a + k \cdot SE(n) \quad (7)$$

このように, タップ周期 ITI が, SE と比例関係にあるモデルが示される.

5.2 ITiv と SE

前節と同様に比例定数 h を用いてタップ周期の変化量 ITiv と同期誤差 SE は以下のように記述される.

$$ITiv(n) = h \cdot SE(n) \quad (8)$$

ITiv を ITI で展開して示すと,

$$ITI(n) - ITI(n-1) = h \cdot SE(n) \quad (9)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し,

$$\begin{aligned} ITI(n) &= ITI(n-1) + h \cdot SE(n) \\ &= ITI(n-2) + h \cdot (SE(n) + SE(n-1)) \\ &\vdots \\ &= ITI(0) - h \cdot (SE(n) + SE(n-1) + \dots + SE(1)) \end{aligned} \quad (10)$$

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

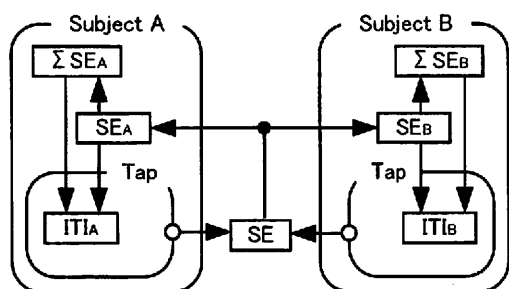


Fig. 8 Framework of cooperative tapping task

$$ITI(n) = b + h \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) \quad (11)$$

ここで示されたモデルは、SE の総和によって、ITI が影響を受けるモデルである。

6. 考察

今回の実験によって得られた結果をまとめる。

- ITI は、他方の直前 ITI に強く影響を受ける。
- SE と ITI, SE と ITI_v, SE_v と ITI_v は、それぞれ相関があり、特に、SE_v と ITI_v, SE と ITI_v において、強い相関が見られた。
- 相関解析を元に、モデル推定を行ったところ、ITI は、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。

(Fig. 8)

ITI が、他方の直前 ITI に強く影響を受けるということは、直前に提示された刺激周期にタップ周期が影響を受けるということである。そのため、従来の人間-機械系における同期タッピング実験において、刺激周期の変動がタップ周期に影響を与える^[9]という知見があり、結果がと一致した。

そして、相関解析の結果と推定されたモデルの結果である SE の変化量に対して、ITI の変化量が比例するというフィードバック的な機構について、従来のタッピングのモデル^[10]とも対応付けすることができる。

7. 終わりに

本研究では、人間同士の協調プロセスにおけるタイミング制御機構を調べるための最小限の機能で構成された、実験系を構成した。そして、得られたデータ解析の結果から、協調タッピング課題におけるモデルの提案をした。

近年、機械化が進む一方で、医療や介護の現場のように、人間と機械が共存しなければならない環境下では、機械が人間と協調作業する能力が求められるであろう。今後このような人間同士の協調作業を解明し、応用することが、この問題への解決につながるのではないかと期

待できる。

参考文献

- [1] D. J. Ingle and B. L. Shook: Action-oriented approaches to visio-spatial brain functions, *Brain mechanisms and spatial vision*, 229-258 (1985).
- [2] L.T.Stevens: On the time sense, *Mind*, **11**, 393/ 404 (1989).
- [3] P.Fraisse: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin (Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/ 257 (1966).
- [4] G. Aschersleben and W. Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, **57- 3**, 305/ 317 (1995).
- [5] Y. Miyake, J. Heisse and E. Pöppel: Dual-anticipation in sensory-motor synchronization, *Proc. of 1st Int. Symp. on Measurement, Analysis and Modeling of human Functions (ISHF2001)*, Sapporo, Japan, 61-66 (2001).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとしての人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, 37-11, 1087/1096 (2001).
- [9] MH. Thaut, T. Bin and M. Azimi-Sadjadi.: Rhythmic finger- tapping sequences to cosine-wave modulated metronome sequences. *Human Movement Science*, **17**, 839-863 (1998).
- [10] J. Mates, T. Radil, U. Müller and E. Pöppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of Cognitive Neuroscience*, **6- 4**, 332/ 340 (1994).