

協調タッピングにおける相互相関解析に基づくモデルの提案

今 誉

A model of cooperative tapping based on correlation analysis

Homare Kon

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. The machine that mounted the proposed models reproduced man's behavior in cooperative tapping task.

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

1. はじめに

現在、我々の生活で、コミュニケーションを支援する様々なシステムが提案されている。例えば、ATM や市営バスのような公共施設で用いられている音声応答^{[1][2]}のように一方の情報に対して他方が応答するような形式があり、他にも情報通信を用いたテレビ会議システムのようなマルチモーダル化^[3-5]によるものや、モバイルシステムの普及により、ワイヤレスシステムを用いたユビキタスネットワーク^[6-8]と言ったものなどが挙げられる。

我々の研究グループでは、特に対面コミュニケーションの際に用いられるような予測性や同時間性を実現し、人間の協調プロセスを支援する人工物^[9-11]を作ることを目指しており、コミュニケーションにおける“タイミング”に着目し、研究を進めてきた。

コミュニケーションにおけるタイミングの研究として、2 者間の対話コミュニケーションの例を挙げると、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“うなずき”などの行動を入れることにより、会話が円滑に進む^{[12][13]}ということが挙げられる。また、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^[14]や、演奏者の呼吸タイミングの同調する^[15]ことなどからも、コミュニケーションにおいて、タイミング合わせは人間の重要な能力であると言える。

人間の予測的な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）^[16]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^[17]。また、Repp らは、刺激周期を非周期的に変動させた実験により、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^[18]。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^[19-22]。我々の研究グループでは、人間の注意資源を考慮した生理学的な側面の解明や、時系列データ解析によるダイナミクスの推定など、成果を上げてきた^{[23][24]}。

同期タッピング課題の実験系を見直すと、人間が機械に一方向的に合わせるという実験系である。そのため、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という問題があった。

そこで本研究では、人間のコミュニケーション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解析の結果に基づき、協調タッピングにおけるモデルを推定し、人間-人間系と人間-モデル系を比較評価することを目的とする。

本論文では、第 2 章で本研究の実験に用いるために構成した実験装置の仕様と実験方法について述べる。第 3 章では、第 2 章で設定した実験の結果を示し、解析を行う。第 4 章では第 3 章の解析結果に基づき、協調タッピングにおけるモデル推定を行い、第 5 章では第 4 章で得られたモデルを実装したシステムを示す。第 6 章ではモデルを実装したシステムを用いて、人間と機械による協調タッピングを行い、その結果から、提案したモデルを

評価する。第7章で考察，第8章で本研究のまとめを行う。

2. 実験装置、実験方法

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 (Fig.1) 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、自己のボタン押し動作 (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を構成している (Fig.2)。両者の Tap 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。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: Synchronization Error) と自己のタップ周期 (ITI: Inter Tap-onset Interval) を解析に用いる特徴量とする (Fig.3)。非同期量 (SE) と、タップ周期 (ITI) を、以下の式で定義する。

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

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

ITI は式(2)から、自己 (一方の被験者) の Tap のみに



Fig. 1 Equipment of cooperative tapping system

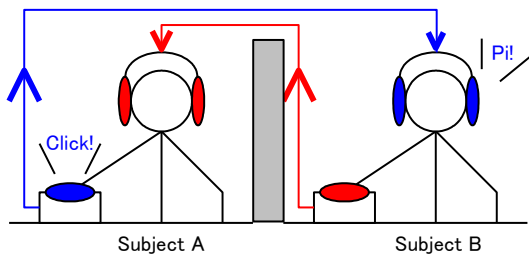


Fig. 2 Cross-Feedback tapping system

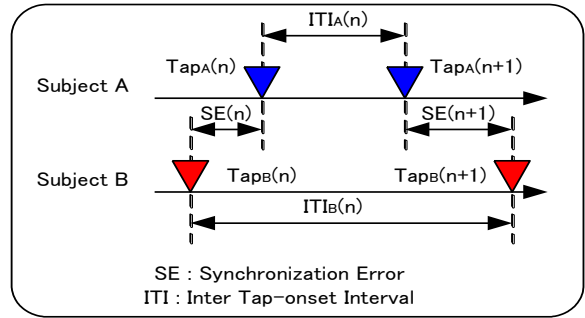


Fig. 3 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap

より定義されるが、SE は式(1)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、 $SE_A(n) = -SE_B(n)$ という正負が反転した関係にある。

2.3 タスク

実験は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 Tap リズムにできる限り同期するように課題を与えた。ただし、予備実験により、この課題のみでは、両被験者の Tap が徐々に加速し、最終的には被験者の Tap が止まってしまい、実験が成立しないことがある。そこで、被験者の Tap の加速を避けるため、主観的に1~2sのTap周期でTapするようにと伝えた。

ボタン押し動作は、右手人差指で行わせた。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、110Tapのデータを得て、有効データとして、不安定な挙動を示す開始直後の10Tapを切り取った100Tap分を解析に用いた。

2.4 被験者・実験環境

課題を遂行する被験者は、健康な20代の男性5名にボランティアで依頼した。2名を1組とし、合計10組のデータを収集した。被験者は右利きで、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、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、解析

実験によって得られた SE と ITI の結果例を Fig.4 に示す。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。ITI を 25Tap ずつ区切り、危険率 5% で t 検定を行った。それぞれ 4 つの区間で平均値に有意な差が見られなかったため、以下の節では定常過程であるとして実験結果を統計と相互相関を用いて解析する。

3.1 統計解析

ここで、SE と ITI に加え、SE の変化量 (SE_v) と ITI

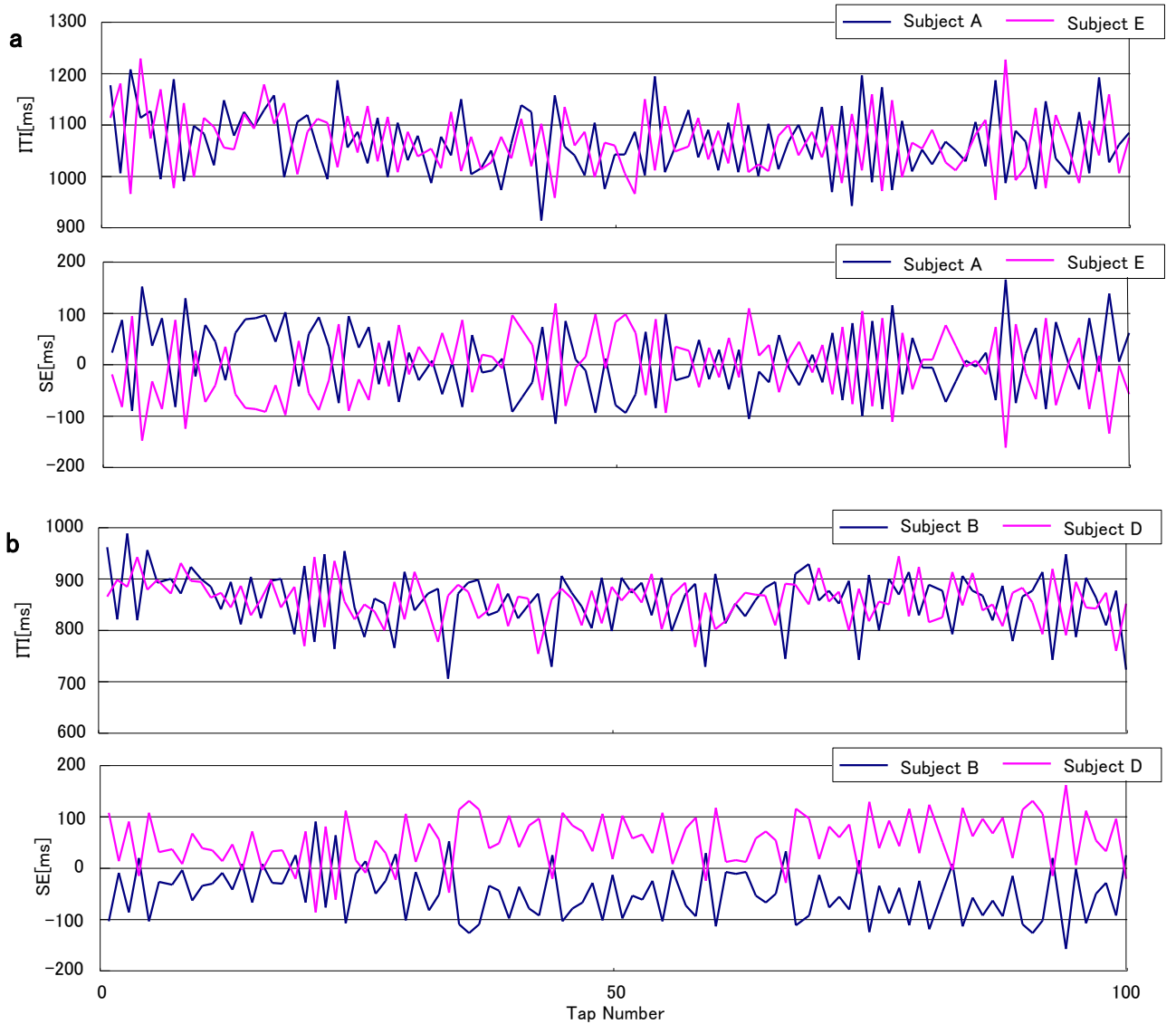


Fig. 4 Two examples of temporal fluctuation of Synchronization Error (SE) and Inter Tapping-onset Interval (ITI) with human

の変化量(ITI_v)を以下のように定義する.

$$SEv_A(n) = SE_A(n) - SE_A(n-1) \quad (3)$$

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

Fig.4に対応した試行より得たSEとITI, SEとITI_v, SE_vとITI_vの散布図をFig.5に示す. それぞれ一次の線形近似直線が引けるように, 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. R²を比較すると, SE_vとITI_vが最も高く, 続いてSEとITI_v, SEとITIというようになっている. この順に相関関係も強いと推測される.

3.2 相互相関解析

前節の統計解析からSEとITIに, 相関関係が示唆された. 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(SEとITI, SEとITI_v, SE_vとITI_v)について, 相互相関解析を行い, c(0)の被験者間平均をFig.6に示し, Lagごとの被験者間平均をFig.7に示す. SEとITI_vで相関係数c(0)=-0.79, SE_vとITI_vで相関係数c(0)=-0.83程度と, 非常に強い相関があることが示された. Fig.7のSEとITI_v, SE_vとITI_vについては, Lag2以降でほぼ同じ値を示した.

4. モデル提案

前章の結果から, 強い相関が見られたSEとITI_v, SE_vとITI_vに比例関係があるとして, モデル推定を行う. 以下の数式では, 被験者を示す添字(A,B)を省略する.

4.1 ITI_vとSE_v

比例定数kを用いてタップ周期の変化量ITI_vと非同期

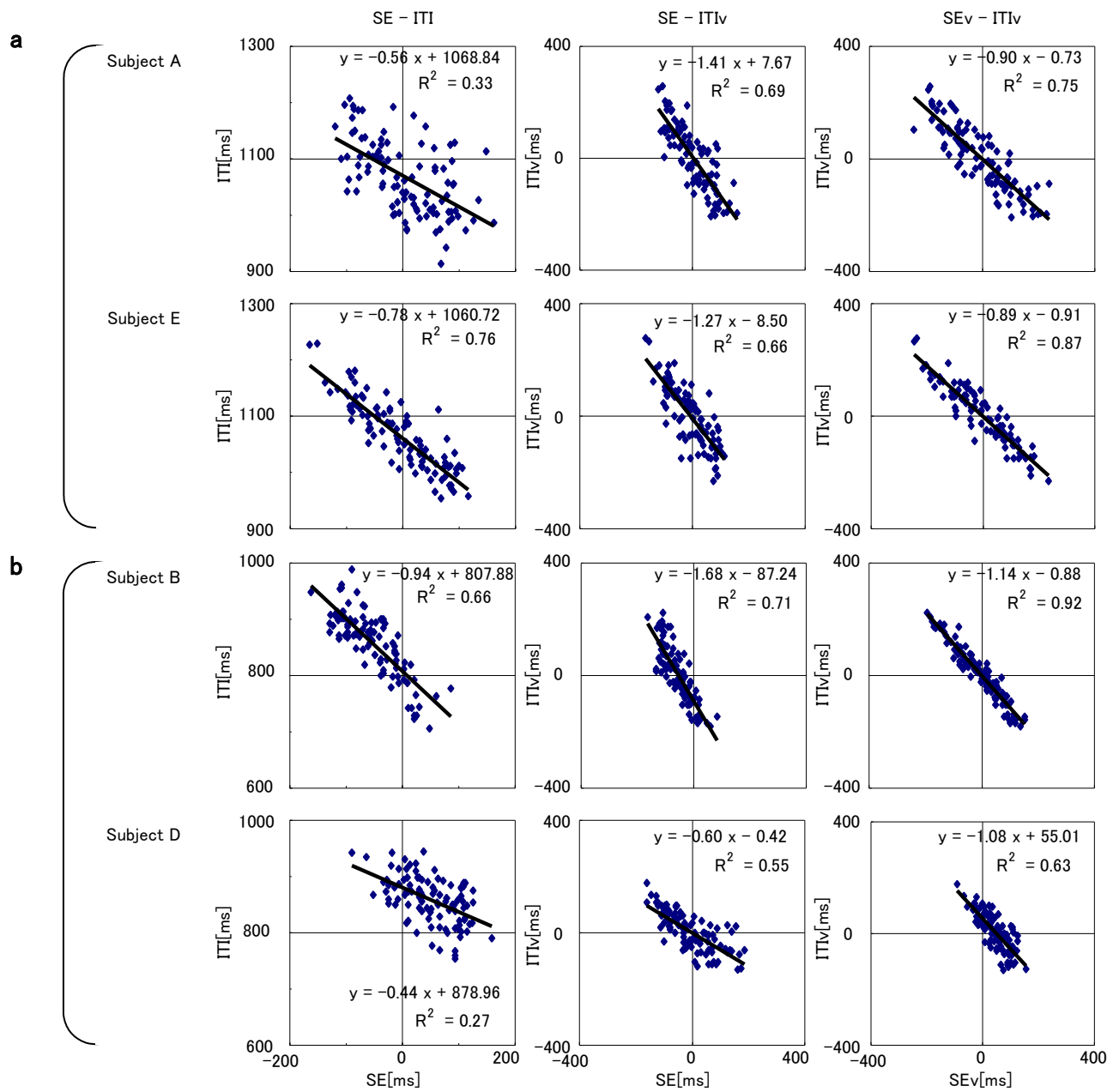


Fig. 5 Scatter plot, SE and ITI, SE and ITIv, SEv and ITIv (with human)

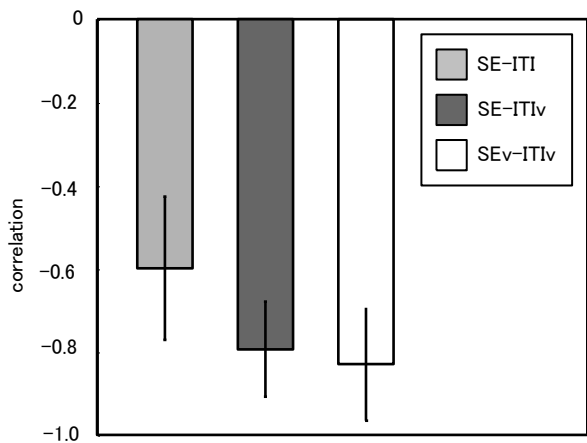


Fig. 6 Correlation coefficient of SE and ITI (with human)

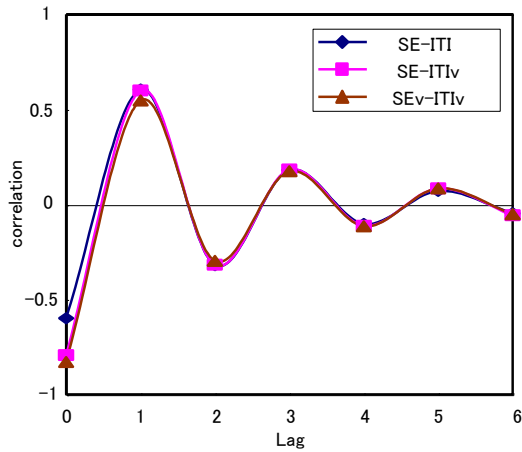


Fig. 7 Correlation coefficient of SE and ITI (with human)

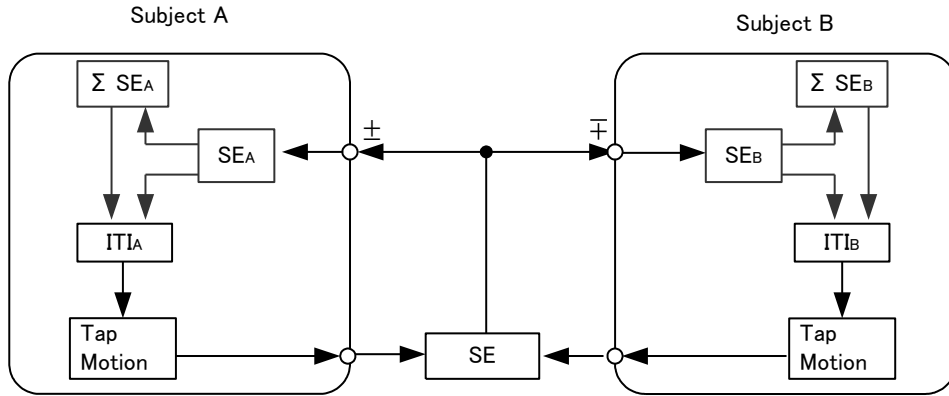


Fig. 8 Framework of cooperative tapping task

量の変化量 SE_v は以下のように記述される.

$$ITI_v(n) = k \cdot SE_v(n) \quad (5)$$

この式を, タップ周期 ITI と, 非同期量 SE で展開して示すと,

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

$$ITI(n) - k \cdot SE(n) = ITI(n-1) - k \cdot SE(n-1)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し,

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

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, 以下のように示されればよい.

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

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示される.

4.2 ITI_v 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 ITI_v と非同期量 SE は以下のように記述される.

$$ITI_v(n) = h \cdot SE(n) \quad (9)$$

ITI_v 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.

式(10)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.

5. 擬似協調タッピングシステムの実装

前章によって得られた2つのモデルの概念図を Fig.8 に示す. 本章では, 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. そして, モデルを組み込んだシステムを示す.

5.1 回帰分析による係数推定

前章で得られた2つのモデルから, n 番目の ITI は, 比例定数 t, l を用いて, 以下のように示される.

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

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。人間2人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、変数x、y、zが独立という条件が必須である。SE(n)と $\Sigma SE(n)$ は従属関係に見えるが、nが増加するに従い、SE(n)と $\Sigma SE(n)$ は相関がなくなるため、xとyが独立であるとしている。本研究で用いた重回帰分析は、変数増減法を用いた。

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、by項が負という関係で求められた。よって、係数bについては、絶対値の被験者間平均で決定し、式(15)のbyの項が負として算出されるように実装した。係数a、cについては、被験者間平均によって求めた。得られたa、b、cの平均値と標準偏差をTable.1に示す。

Table 1 multiple linear regression analysis

Coefficient	a	b	c
Average	-0.68	2.45	866
SD	0.24	0.87	128

5.2 モデル実装システム

モデルを実装したシステムは、基本的に第2章で示した実験装置と同様であり、人間とモデルがTapする時刻を記録するシステムになっている。基本的なシステムの挙動は、モデルの音刺激提示時刻と被験者のタップ時刻との差から次の音刺激提示時刻を算出するシステムとなっている。

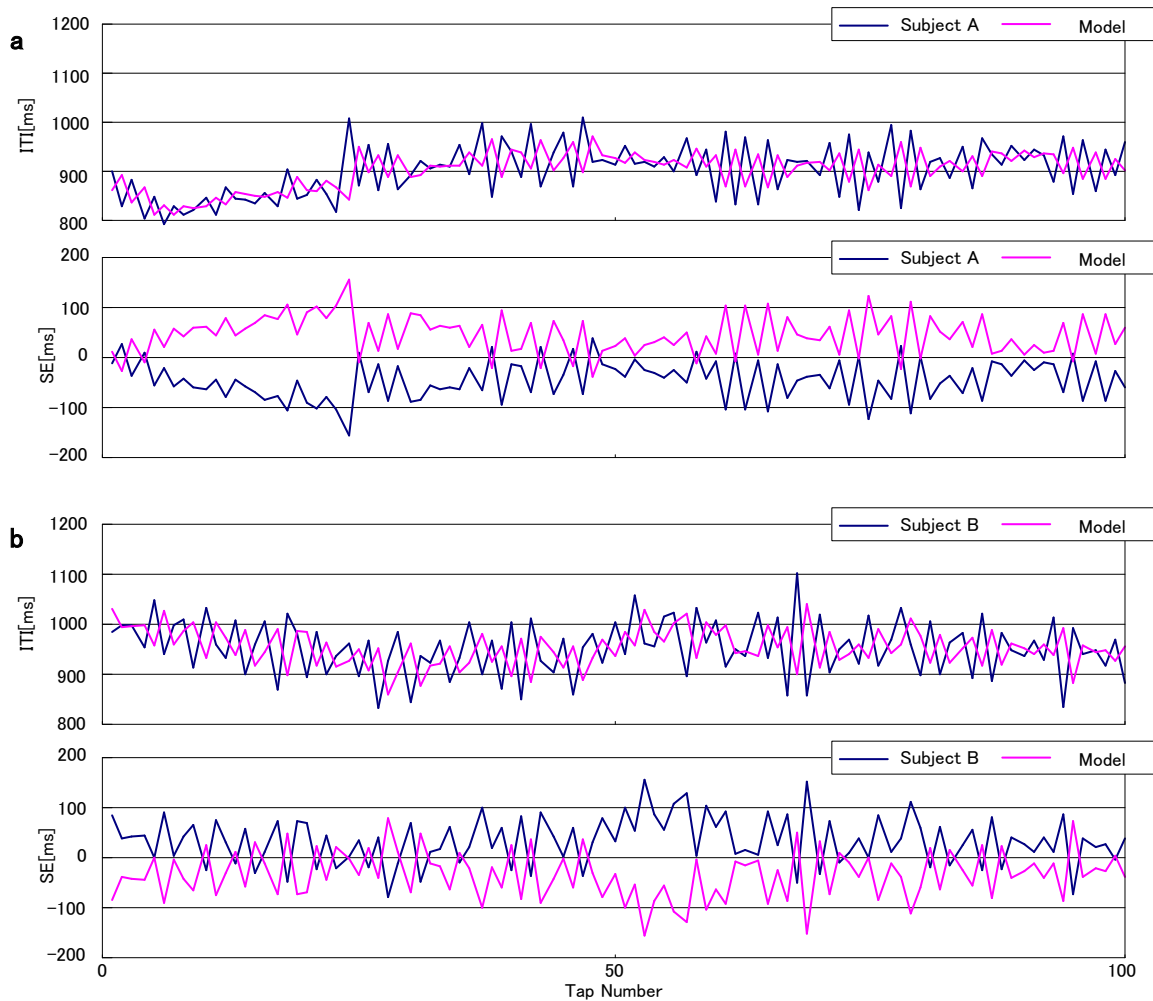


Fig. 9 Two examples of temporal fluctuation of Synchronization Error (SE) and Inter Tapping-onset Interval (ITI) with model

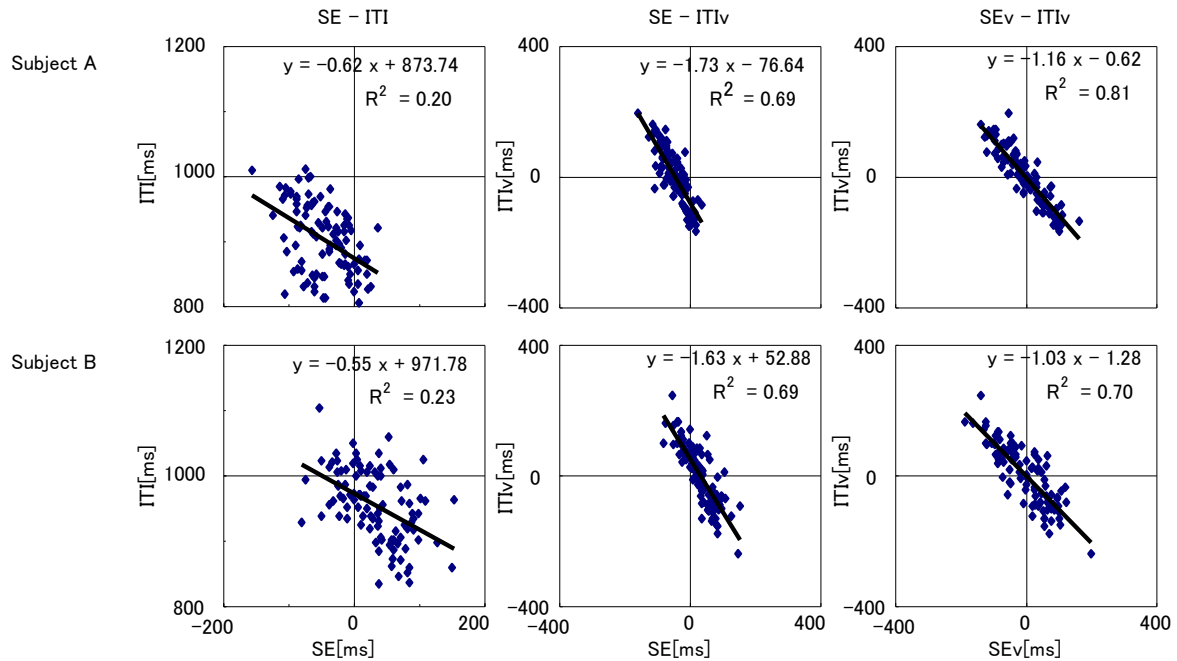


Fig. 10 Scatter plot, SE and ITI, SE and ITIv, SEv and ITIv (with model)

実装したシステムのフローチャートは付録に添付する。

6. モデル評価

第 5 章で示したシステムを用いて、人間とモデル実装システムとの協調タッピング実験を行った結果を Fig.9 に示す。被験者は、第 2 章 4 節で示した 5 名の協力を得て行った。被験者に与えたタスクと実験環境は、第 2 章と同様である。

人間同士の場合と、人間とモデル実装システムの場合を比較し、モデル実装システムの評価をした。具体的な評価指標については、第 3 章で用いた統計解析、相互相関解析に加えて、自己相似性（フラクタル性）の検討として Detrended Fluctuation Analysis（以下 DFA）を用いてモデルの評価を行った。

6.1 統計解析

散布図によって、人間側の SE と ITI の比例関係を調べる。システム側の挙動は SE に比例したタップ周期を出力するように組み込まれているため、第 5 章で示した比例関係が見られるの当然であるため、ここでは省略する。

被験者 2 名分の SE と ITI, SE と ITIv, SEv と ITIv の散布図を Fig.10 に示す。人間同士の場合と比べ、全体的なばらつきが大きくなっており、 R^2 値も減少しているが、いずれの場合にも、負の比例関係があることが示されている。人間同士の場合と同様の挙動をしていることが言える。

6.2 相互相関解析

人間同士の第 3 章での設定と同様に、それぞれの 3 つのパターン（SE と ITI, SE と ITIv, SEv と ITIv）につい

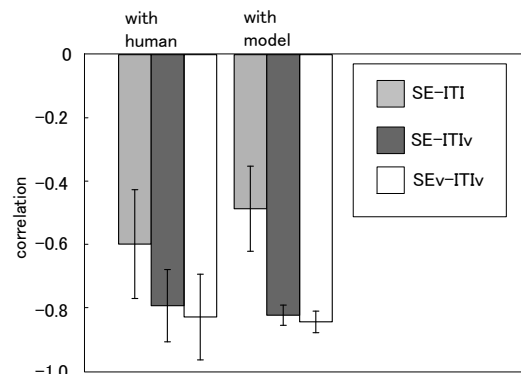


Fig. 11 Correlation coefficient of SE and ITI

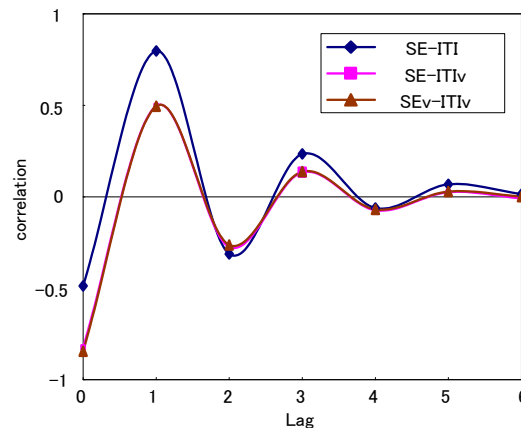


Fig. 12 Correlation coefficient of SE and ITI (with model)

Table 2 Correlation coefficient of SE and ITI

	with human Ave (SD)	with model Ave (SD)
SE-ITI	-0.60 (0.17)	-0.49 (0.13)
SE-ITIv	-0.79 (0.11)	-0.82 (0.03)
SEv-ITIv	-0.83 (0.14)	-0.85 (0.03)

て、相互相関解析を行い、その $c(0)$ の被験者間平均を Fig.11, Table.2 に示し、Lag (時間遅れ) ごとの被験者間平均を Fig.12 に示す。人間同士の場合同様に、SE-ITI, SE-ITIV, SEv-ITIV という順で負の相関値が強くなっていく傾向が見られた。

被験者間の相関値について、人間同士の場合とモデル実装システムの場合を比較するために、f 検定を行ったところ、SE-ITI では、 $F(19, 9) = 1.63, n.s$ で、等分散であるという帰無仮説が棄却されず、分散に有意な差は見られなかった。SE-ITIV で $F(19, 9) = 12.74, p < .05$ であり、SEv-ITIV では $F(19, 9) = 15.77, p < .05$ となり、帰無仮説は棄却され、分散に有意な差があることが示された。

f 検定の結果を元に、SE-ITI については等分散であると仮定した場合の、SE-ITIV と SEv-ITIV については分散が等しくないとして仮定した場合の t 検定による平均値の検定を危険率 5% で行った。その結果、それぞれ、 $t(29) = 1.64, n.s$, $t(29) = 1.08, n.s$, $t(29) = 0.46, n.s$ と示され、いずれの場合も平均値に差がないという帰無仮説が棄却されず、人間同士の場合とモデル実装システムの場合での相関値の平均値には有意な差がないことが言えた。

人間同士の場合とモデルとの場合の Lag を考慮した相互相関値 (Fig.7, Fig.12) を比較すると、SE と ITI の相関値が Lag1, Lag3 で大きく異なっていることがわかる。

6.3 自己相似性の検討(DFA)

人間同士の演奏の位相差には自己相似性が見られ、特徴的であるといわれている^[25]。そこで、今回行った人間同士、または人間とモデルの協調タッピングの位相差の時間スケールングにおいても自己相似性が見られるか否かを検証し、モデルを評価する。

自己相似性を検知する解析手法に DFA^[26]があり、非定常時系列データの解析法である。各条件の SE 時系列について DFA を行い、スケールング指数を元に評価する。

6.3.1 DFA の手順

SE の時系列データ $SE(n)$, ($n=1, 2, \dots, N$) を DFA 対象とする。この N 個の時系列データの平均値を \overline{SE} として、新しい時系列 $y(k)$, ($k=1, 2, \dots, N$) を以下のように定義する。

$$y(k) = \sum_{j=1}^k (SE(j) - \overline{SE}) \quad (16)$$

平均値を 0 化した SE の時系列データを順に足していく

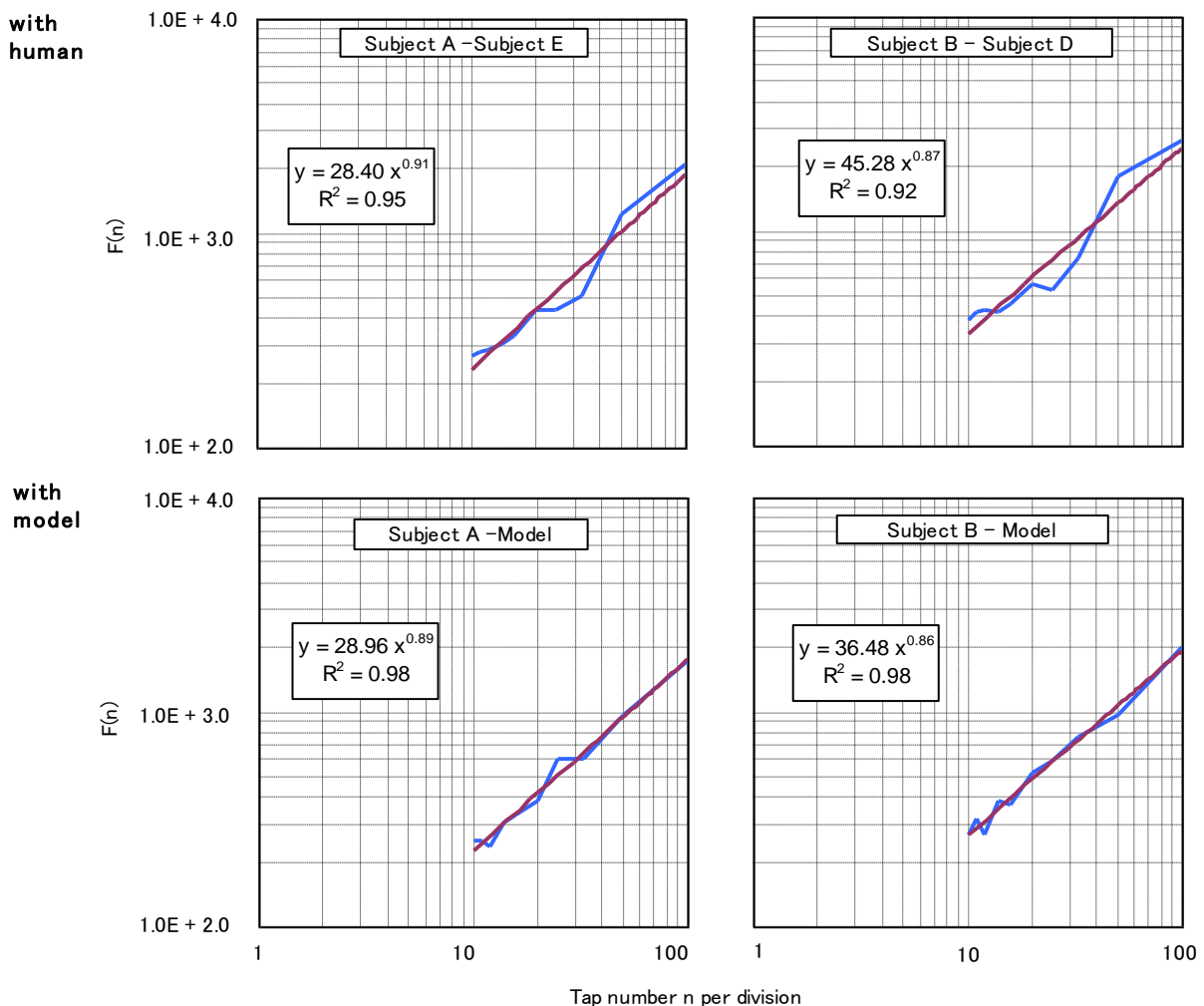


Fig. 13 $F(n)$ - n plotting of DFA examples

過程としてあらわされるため、 $y(N)=0$ となる。

これを n 点ずつのデータからなる等間隔の区間に分け、各分割区間で $y(k)$ を最小二乗法を用いて直線近似する。この近似直線(近似値)を $y_{ls}(k)$ と置くと、この直線は各分割区間におけるデータの推移傾向(trend)を示している。各々の $y(k)$ について近似値 $y_{ls}(k)$ と以下に示される残差が存在する。

$$\Delta y(k) = y(k) - y_{ls}(k) \quad (17)$$

この $\Delta y(k)$ で得られる残差平方和の平方根 $F(n)$ を求める。

$$F(n) = \left(\sum_{j=1}^n \Delta y(j)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

ここで、 $F(n)$ - n の両対数プロットについて、スケーリング指数 γ を用いて、

$$F(n) \propto n^\gamma \quad (19)$$

という上記の式で示される線形関係がある場合、 n によるスケーリングが成立していて、統計的に自己相似性が示される。スケーリング指数 γ と $1/f^\beta$ との間には、

$$\beta = 2\gamma - 1 \quad (20)$$

の関係がある。これによって、DFA からホワイトノイズ($\gamma=0.5$)、 $1/f$ ゆらぎ($\gamma=1$)、ブラウンノイズ($\gamma=1.5$)等が分類できる。

6.3.2 DFA 結果

SE の時系列データ 100 個に対し、分割区間のデータ数 $n=10 \sim 100$ まで解析した結果を **Fig.13** に示す。各条件のスケーリング係数 γ から式(20)によって導かれ、 $1/f^\beta$ ゆらぎとして示される β の被験者間平均と標準偏差を **Table 3** に示す。

人間同士の場合もモデルとの場合もともに、 R^2 値が $0.90 < R^2 < 0.99$ を示しており、 n によるスケーリングが成立している。このことから SE に自己相似性があることがわかる。人間同士とモデルとの場合での β の値から、SE に $1/f$ ゆらぎがあることも予測される。

β について f 検定を行ったところ、 $f(4, 9) = 1.16, n.s$ であり、分散に有意な差がないという帰無仮説は棄却されず、等分散であることが言える。この f 検定の結果を元に、等分散を仮定した t 検定を行った結果、 $t(13) = 1.59, n.s$ であり、平均値に差がないという帰無仮説は棄却されず、人間同士の場合とモデルとの場合での β の平均値に有意な差は見られなかった。

Table 3 Mean gradient β

	β	SD
with human	0.56	0.18
with dual model	0.70	0.19

7. 考察

本研究で得られた結果をまとめる。

- I. 人間同士のタイミング合わせのメカニズムを調べるための実験系である、協調タッピングシステムを構成した。
- II. 人間同士の協調タッピングの結果から、SE と ITI, SE と ITIv, SEv と ITIv は、それぞれ相関があり、特に、SEv と ITIv, SE と ITIv において、強い相関が見られた。
- III. 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。
- IV. 上記の2つのモデルを人間同士の協調タッピングの実験結果から重回帰分析でモデル係数を推定し、システムに実装し、人間とモデルの強調タッピング実験を行った。
- V. 人間とモデルの場合の SE と ITI の関係は、人間同士の場合とほぼ同様で、SE と ITI, SE と ITIv, SEv と ITIv のそれぞれに相関があり、特に、SEv と ITIv, SE と ITIv において、強い相関が見られた。
- VI. 人間同士とモデルとの場合の時間遅れ(Lag)を考慮した相互相関値で、SE と ITI の相関値に Lag1, Lag3 で違いが見られた。
- VII. SE について DFA を行うことにより、人間同士の場合も、人間とモデルの場合でも、時間スケーリングで自己相似性が見られ、 $1/f$ ゆらぎの存在が示唆された。

上記にまとめたように、人間同士の協調タッピングにおける相関解析の結果から、モデルを推定、実装した。そして、人間とモデルとの協調タッピングを行い、その結果を解析したところ、人間同士の協調タッピングで見られた特徴をほぼ再現できたといえる。

結果IIIについては、実装された式(8)で示されるモデル(SE と ITI が比例関係にあるモデル)は、引き込みモデルと一致している。得られた係数 a に関しても過去の知見^[18]と非常に近い値であり、このモデルの妥当性が言える。

モデルの定数項 c は定義されたとおり、初期の ITI_0 とある定数 C_1 によるものである。重回帰分析によって得られた係数 c の値から、本実験の主観的に 1~2 秒のタップ周期で同期という課題に影響を受けていると考えられる。

それに加え、式(12)で示されるモデル (SE の総和から得られるモデル) は、初期 ITI に SE の履歴を加えることで、現在のタップ状態を求めることができると解釈できるが、試行を重ねても人間が初期のタップ状態を記憶しているとは考えにくい。それに加え、本論文では載せなかったが、モデル同士の協調タッピングシミュレーションをしたところ、10Tap 以内に SE=0 に収束し、双方の ITI が一致してしまい人間同士の協調タッピングを再構成できなかつたということからも、本研究で提案したモデル式の定数項 c には、何か他の要因を含んでしまったと考えられる。

結果IVについて、実験結果の SE について考察する。SE が負であるということは、式(1)で示されるように、他方の Tap よりも自己の Tap が先行しているということを示している。この提示音よりも指タップが先行すると言うこの現象は、同期タッピング課題の研究で、” Negative Asynchrony (負の非同期)”^[31-33]といわれている。この現象は周期的である音刺激に対する同期タッピング課題においては必ず観測される現象である。Fig.4 に示される人間同士の協調タッピングの場合では、どちらか一方で負の非同期が見られる。本論文では結果を示さなかったが、式(8)に示される 1 つのモデルのみを搭載したシステムとの協調タッピングを行ったところ、被験者側でのみ負の非同期がみられた。一方で、Fig.9 に示した 2 つのモデルからなるシステムとの結果では、モデル側でも負の非同期が見られる場合がある。このことから、式(12)で示されるモデルは、負の非同期をシステム側が持つか、人間側に持たせるかを判断しているモデルではないかと示唆できる。

結果VIIについて、人間同士の SE に自己相似性が見られ、 $1/f$ 特性があることがわかった。この $1/f$ ゆらぎは定常歩行の歩行周期において現れており^[27]、歩行運動は主に Central Pattern Generator (CPG) と末梢からの感覚等で発生する反射の組み合わせにより生成されている。またこれら CPG や反射の機構は主として脊髄に存在し、小脳などの上位の中枢から調節を受けていることも知られている^[28]。この他さまざまな例^[29-30]があるが、生体リズムの $1/f$ ゆらぎは、自動的リズム生成系と上位の神経系からの調節という組み合わせで見られている。そのため、SE の DFA でみられた $1/f$ 特性がここで述べた神経系に関わる可能性は大いにある。今後、生体リズムの $1/f$ ゆらぎも考慮したモデルを導入することで、人間-人間系の協調システムの再構成に役立つと考えられる。

結果VIに示されたことから、SE と ITI の時間遅れをモデルで再現することができなかつたと言える。人間とモデルの協調タッピングでは、主観的に違和感があるという被験者の感想があり、完全に人間同士の協調タッピングを再構成したものではないと言っている。本研究で行わなかつた他の評価手法を導入することで、さらに違いを明

らかにすることで、人間の協調プロセスを再構成することができると考えられる。

8. まとめ

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実験系を構成した。その実験から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、システムに実装した。再構成した擬似協調タッピングシステムを対人間で実験することで、モデルを評価した。その結果から、時系列データの特徴、統計解析、DFA を用いて人間同士の協調タッピング時と比較し、ほぼ同様の挙動を示す擬似協調タッピングシステムを再構成することができた。

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。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を賜りました三宅美博助教教授に感謝をいたします。多くの場面で研究への助言をいただき、公私共にお世話になった、三宅研究室の方々に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 安達史博, 河原達也, 奥乃博, 岡本隆志, 中嶋宏: VoiceXML の動的生成に基づく自然言語音声対話システム, 情報処理学会研究報告, SLP-40-23, HI-97-23 (2002)
- [2] 上野晋一, 駒谷和範, 河原達也, 奥乃博: バス運行情報案内システムにおけるユーザモデルを用いた適応的応答の生成, 情報処理学会研究報告, SLP-42-2 (2002)
- [3] Nakanishi H., Yoshida C., Nishimura T., Ishida T.: FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network, CSCW'96, 308/314 (1996)
- [4] Sugawara S., Suzuki G., Nagashima Y., Matsuura M., Tanigawa H., Mriuchi M.: InterSpace: Networked Virtual World for Visual Communication, IEICE Trans Inf. and Syst, E77-D-12, 1344-/1349 (1997)
- [5] Colin S.H., Gordon M.M.: Mechatronics applied auditory localization for telepresence, Mechatronics, 9, 803/816 (1999)
- [6] 椎尾一郎, 安村通晃, 福本雅明, 伊賀聡一郎, 増井俊之: モバイル&ユビキタスイタフェース, ヒュー

- マンインタフェース学会論文誌, 5- 3, 313/ 322 (2003)
- [7] Steve H.L. Liang, Arie Croitoru and C., Vincent Tao: A distributed geospatial infrastructure for Sensor Web, Computers & Geosciences (In press) (2004)
- [8] Eylem Ekici: On signaling performance bounds of location management in Next Generation Wireless Networks, Computer Networks, 46, 797-816 (2004)
- [9] 三宅美博: 共創型インタフェースとしての人間-機械系, 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 4659 (2002)
- [10] Miyake Y.: Co-creation in human-computer interaction, in C Stephanidis & J Jacko (Eds.), Human-Computer Interaction, 513/ 517, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, London, (2003)
- [11] 武藤剛, 三宅美博: 人間-人間協調歩行系における共創出プロセスの解析, 計測自動制御学会論文集, 40- 5, 554/ 562 (2004)
- [12] 三宅美博, 辰巳勇臣, 杉原史郎: 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 40- 6, 670/ 677 (2004)
- [13] 菊池英明, 白井克彦: 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誌, 2- 2, 145/ 152 (2000)
- [14] Condon, W.S., Sander L.W.: Neonate Movement is Synchronized with Adult Speech, Science, 83, 99/ 101 (1974)
- [15] 長岡千賀, 小森政嗣, 中村敏枝: 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, 603 (2000)
- [16] Dunlap K.: Reaction to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize, Psychological Review, 17, 399/ 416 (1910)
- [17] 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, 17, 839-863 (1998)
- [18] Repp, B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, Human Movement Science, 20, 227/ 312 (2001)
- [19] Hary, D., Moore, G.P.: Synchronizing human movement with an external clock source. Biological cybernetics, 56, 305/ 311 (1987)
- [20] Haken, H., Kelso, J.A., Bunz, H.: A theoretical model of phase transitions in human hand movements. Biological Cybernetics, 51- 5, 347/ 356 (1985)
- [21] Thaut M.H., Schause, L.M.: Weakly-coupled oscillators in rhythmic motor synchronization, Proceedings of the Society for Neuroscience, 298, 20 (Abstract) (1997)
- [22] 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)
- [23] 三宅美博, 大西洋平, エルンスト・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, 38- 12, 1114/ 1122 (2002)
- [24] 小松知章, 三宅美博: 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, 39- 10, 952/ 960 (2003)
- [25] 土井滋貴, 秋山好一, 松田稔: 楽器演奏時の 1/f ゆらぎに関する考察, 94 年音楽音響研究会予稿 (1994)
- [26] Stanley H.E., Amaral L. A.N., Goldberger A.L. Havlin S., Ivanov P.Ch., Peng C. -K.: Statistical physics and physiology : Monofractal and multifractal approaches, Physica, A270, 309/ 324 (1999)
- [27] Hausdorff J. et al: Is walking a random walk? Evidence for long-range correlation in stride interval of human gait, Journal of Applied Physiology, 78, 349/ 358 (1995)
- [28] 多賀敏太郎: 生命システムのデザイン原理を探る, 数理科学, 394, 5/ 13 (1996)
- [29] Kobayashi M. and Musha T.: 1/f Fractuation of heartbeat period, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 29, 456/457 (1982)
- [30] Yamamoto Y., Nakamura Y., Sato H., Yamamoto M., Kato K., and Hughson R. L.: On the fractal nature of heart rate variability in humans; effects of vagal blockade, Regulatory Integrative Comparative Physiology, 269- 4, R830/ R837 (1995)
- [31] Stevens L.T.: On the time sense, Mind, 11, 393/ 404, (1886)
- [32] Fraisse P.: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J. Requein (ed), Anticipation et comportement, Centre National, Paris, 233/ 257 (1966)
- [33] Aschersleben G., Prinz W.: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, Perception & Psychophysics, 57- 3, 305/ 317 (1995)

付録

第 5 章の擬人化協調タッピングシステムに搭載したプログラムの基本動作のフローチャートと変数の概要を記載する。

変数	説明
idx	タップ番号
MAX_TAP	記録するタップ数
hTapOnset	人間のタップ判別用変数
mTapOnset	機械のタップ判別用変数
hTap[MAX_TAP]	人間のタップ時刻記録配列
mTap[MAX_TAP]	機械のタップ時刻記録配列
SE[MAX_TAP]	SE 記録配列
SE_Sum	SE の総和記録変数
SE_Average[MAX_TAP]	SE 平均記録配列
RTC_Time	RTC 時間 (1/1024 秒で割り込み)
NowTime	実時間変数[ms]
a, b, c	重回帰分析によるモデル係数

