

時間遅れを伴う協調タッピングにおけるタイミング共有の特性

○朝日 健太^{*1} 三宅 美博^{*1}

Characteristics of Timing Coordination in Cooperative Tapping with Time Lag

○Kenta Asahi^{*1} and Yoshihiro Miyake^{*1}

Abstract - One of the serious problems on the network supported human cooperation system is time delay in signal transmission. To overcome this problem, we studied the timing coordination mechanism in cooperative tapping with time lag. Analyzing temporal development of synchronization error (SE) and inter tap-onset interval (ITI) in cooperative tapping process under various time lags, the relationship between time lag and SE, and between time lag and ITI were clarified. Finally, based on correlation analysis of SE and ITI, we proposed the timing coordination model with time lag.

Keywords: cooperative tapping, timing coordination, time lag, communication

1. はじめに

昨今、急速にネットワーク技術が発展し、普及する中で、ネットワークを介した協調作業の需要が広がり、マルチキャスト通信を用いた多人数同時対話^[1]や遠隔地間での音楽アンサンブル^{[2][3]}など、様々な分野へのネットワーク技術の応用が試みられている。

しかし、現状のネットワークシステムではラグやジッター等の遅延の存在により通信が不安定であり、高度なコミュニケーションを取るには不十分である。これまでは、この問題に対して、未来のデータを予測しシステムを制御することにより被験者に遅延を感じにくくするという方法^{[4][5]}が取られてきた。一方、人間同士の協調作業では、全く遅延が無の場合でも同期を取ることが出来なくなる現象も報告されている^[6]。これは一般的に、負の非同期として知られている現象^{[7][8]}であり、特にタイミング制御における認知的応答性の違い^[9]に起因して生じると考えられている。

以上のことより、人間-人間系の協調作業における遅延への適応限界が、上限だけでなく下限にも存在することが予想される。したがって、この範囲内に人間がタイミングを合わせやすい遅延域が存在するものと考えられる。

この様な仮説のもとで、本研究では本来ある人間の身体的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点を調べる実験系として協調タッピング課題に注目する。そして、ネットワーク遅延の代替として一定の遅延を加えることが可能な協調タッピングシステムを構成する。そこから得られたデータの解析結果から、人間同士の協調作業に対して情報伝達の遅延が及ぼす特性に関する知見を得ることを本研究の目的とする。

2. 実験システム

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人の被験者が1組となり使用する。自己のボタン押し動作 (Tap) が、他方の被験者に音刺激 (Buzzer) 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。

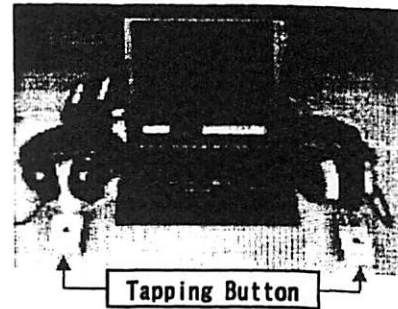


Fig. 1 Equipment of cooperative tapping system

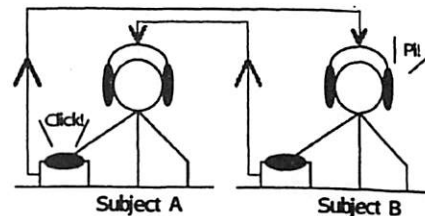


Fig. 2 Cross-Feedback tapping system

*1: 東京工業大学大学院 総理工学研究所

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

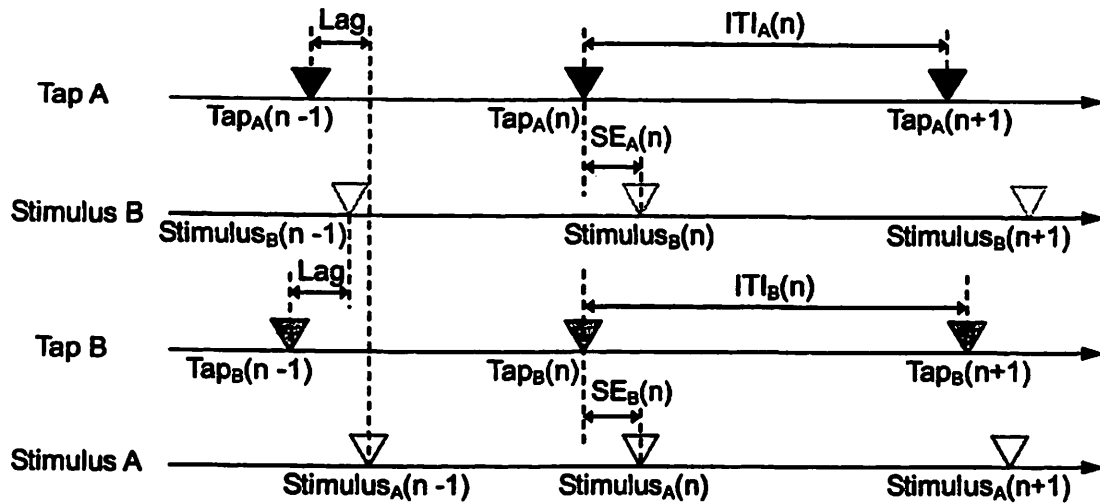


Fig. 3 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap

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 (Synchronization Error : SE) と自己のタップ周期 (Inter Tap-onset Interval : ITI) を解析に用いる特徴量とする。また、Tap してから相手に刺激が与えられるまでの時間的遅延を Lag とする (Fig. 3)。SE と ITI を、以下の式で定義する。

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

$$SE_A(n) = Tap_A(n) - Stimulus_B(n) \quad (2)$$

ただし、

$$Stimulus_B(n) = Tap_B(n) + Lag \quad (3)$$

ITI は式(1)から、自己 (一方の被験者) の Tap 時刻のみにより定義されるが、SE は式(2)より、自己の Tap 時刻と他者より Tap による音刺激時刻から定義される。Lag が与えられないときは、自己の Tap 時刻と同時に他者に音刺激が提示され、Lag が与えられるときは、自己の Tap 時刻から Lag 時間後に他者に音刺激が提示される。つまり自己は他者の Tap に合っているのではなく、Lag 時間後の音刺激に合わせていることになる。

また、SE が ITI の 50% を超えてしまった時点で Tap が一つだけれたことになるため、タッピングが崩壊したものと定義する。ただし、実際の被験者の主観的な認知を踏まえると、50% を超えたタップは他方の次の Tap と合わせたものと考えられるため、解析の段階で、余った Tap を削除する作業を全体に行うものとする。

2.3 タスク・被験者

自己の Tap を他方の被験者からの刺激音とできる限り同期するように課題を与えた。先に定義した特徴量で言い換えると、被験者の主観上で、SE を 0 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。ただし、自己がタップしてから他者に音刺激が届くまでに一定の Lag を与えている。また、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を動かしてリズムをとってはいけないという制限を与えた。

課題を遂行する被験者はいずれも 20 代の右利き (エディンバラ利き手テストにより確認) の男性で、健康な大学院生 3 名と大学生 1 名にボランティアとして依頼した。全被験者とも、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。

2.4 実験手順・実験環境

1 回の試行において両被験者に 145Tap させ、試行開始直後の不安定データ (15Tap) を除き、130Tap 分を有効データとして得た。試行は 1 ペアにつき、Lag を 10ms 刻みで 0ms, 10ms, ..., 130ms と与えた計 14 回行い、これで 1 セッションとした。このセッションを、全 4 名で 2 名を 1 ペアとした計 6 ペアに対して実施してデータ収集した。

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静かな環境を用意した。

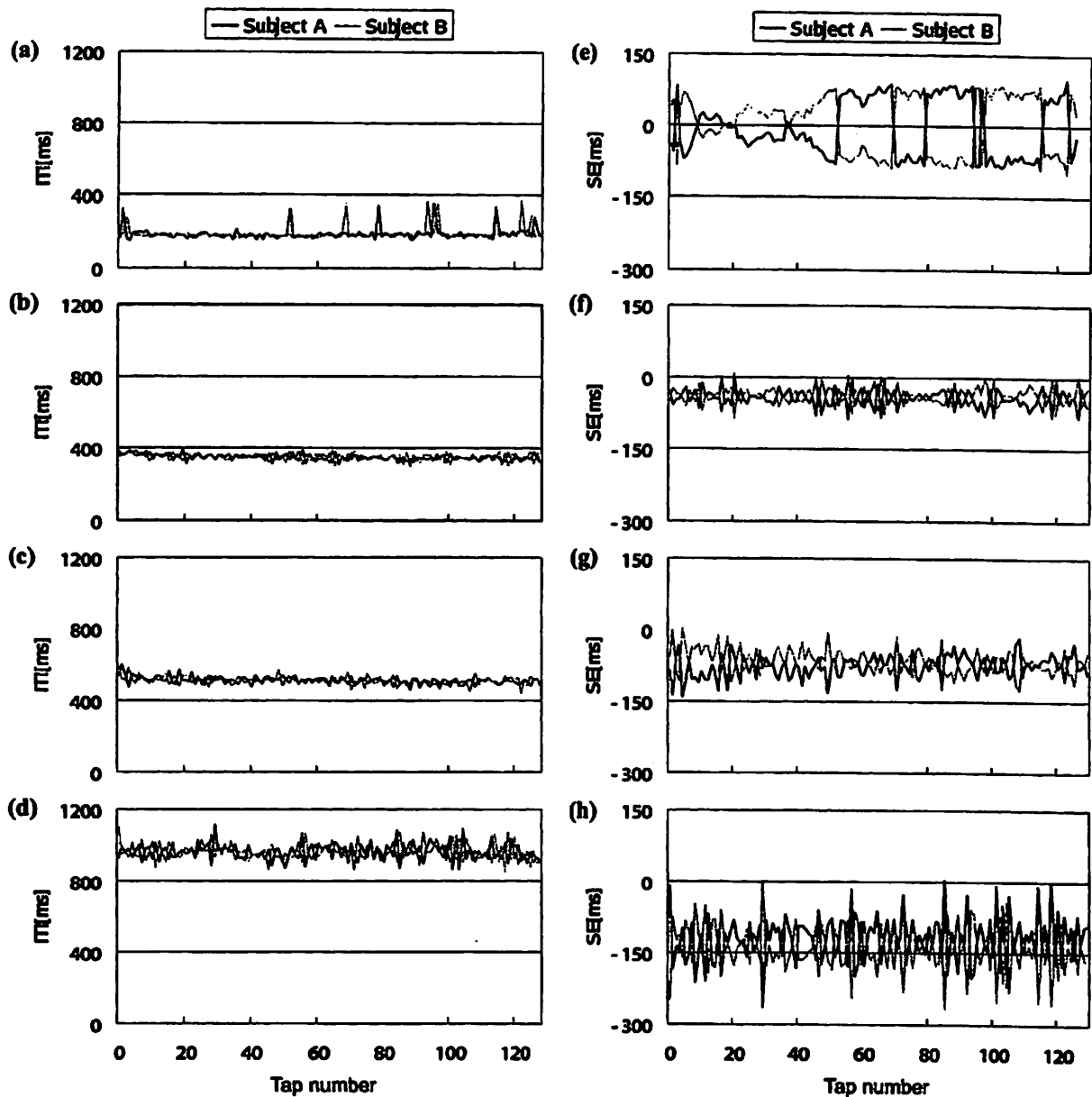


Fig. 4 Raw time series data of pair of subjects' ITI and SE. (a)-(d) show ITI. (e)-(h) show SE. (a) and (e) show the case of Lag = 0ms. (b) and (f) show the case of Lag = 40ms. (c) and (g) show the case of Lag = 70ms. (d) and (h) show the case of Lag = 130ms.

3. 実験結果

3.1 ITI と SE の時間発展

Lag を与えない場合(Lag=0ms), Lag を 40ms 与えた場合, Lag を 70ms 与えた場合, Lag を 130ms 与えた場合の, ある被験者ペアの Tap 周期 (ITI) の時系列データを及び同ペアの非同相量 (SE) の時系列データの例を Fig. 4 に示す.

Lag=0ms-20ms ではほぼ全ての試行においてタッピングが崩壊した. Lag=30ms-90ms 程度では個体差があるものの ITI も SE も揺れが少なく比較的安定であったが, Lag=100ms 以上では ITI・SE の変動が大きく不安定であることがわかる.

Lag=0ms の場合, ITI は基本的に常時小さい値を取っているが, 2 倍近い値を取っている部分が存在し, 同時に SE は位相が反転した状態になっている. これらの点では 1Tap 分

ずれてタッピングが崩壊したことを表しており、全体で数周期タップがずれていることになる。

タッピングが成立した Lag=40ms,70ms,130ms の場合をそれぞれ比較すると、Lag が大きくなると共に ITI の大きさも大きくなっていることが見て取れる。また、Lag=40ms,70ms の場合には、ITI・SE の変動が比較的小さいのに対し、Lag=130ms の場合にはこの変動が非常に大きいこともわかる。よって、Lag=130ms では各被験者の Tap 周期(ITI)が不安定であり、被験者同士の Tap のずれ(SE)が大きいものと推測できる。

3.2 統計解析による安定性評価

ITI の標準偏差の被験者ペア間平均を Fig. 5 に、SE の標準偏差の被験者ペア間平均を Fig. 6 に示す。両者共によく似た傾向を示し、Lag=40ms を最小値として Lag=0ms-40ms では単調減少、Lag=40ms-130ms では単調増加していることが見て取れる。

また、Lag=0ms-20ms ではタッピングが崩壊していることから ITI・SE の偏差が大きくなるが、Lag=30ms-70ms では偏差が比較的小さくなる。

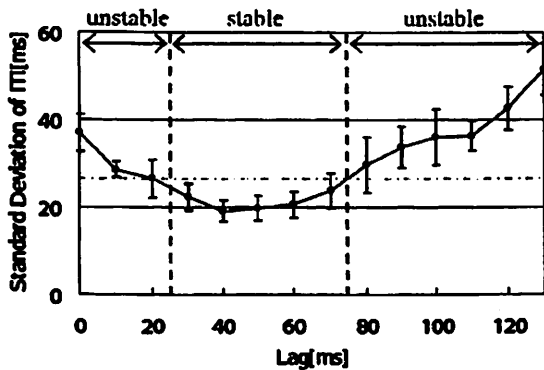


Fig. 5 Standard Deviation of ITI

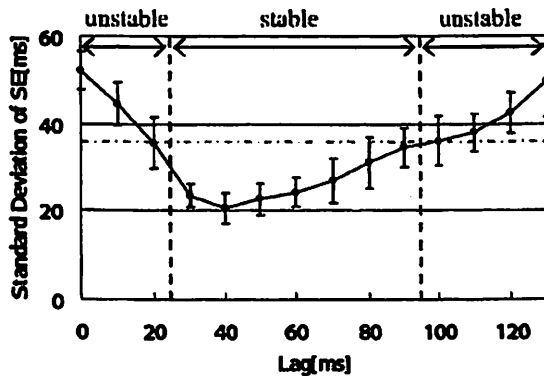


Fig. 6 Standard Deviation of SE

しかし、Lag=80ms-100ms では徐々に偏差が大きくなり、Lag=110ms 以上では偏差の上がり幅が急に大きくなっていることも共通に見て取れる。今回の実験では Lag=130ms までしかデータを取らなかったが、このまま Lag を増やしていくことによりさらに偏差が増加していくことが予想される。

そこで、ここでは標準偏差に対して閾値を設定することにより安定性を評価する。たとえば、タッピングが崩壊している Lag=20ms での標準偏差より小さい値を取る試行で安定、それ以外の領域で不安定であると定義することにより、ITI の標準偏差では Lag=30ms-70ms の試行で安定、SE の標準偏差では Lag=30ms-90ms の試行で安定と判断することができる。以下では、両者の重なりをとって、共通な Lag=30ms-70ms を安定領域とみなす。

ただし、上記の安定性評価は厳密な方法とは言えない。今回は第一段階として、このような安定性評価を行なったが、より厳密にはリアプノフ指数の推定等による安定性評価が必要であり、今後はそのような方法も取り入れていくことを付け加えておく。

3.3 ITI と SE の収束値

前節で定義された安定領域において、与えた Lag に対応する安定な ITI の収束値を調べる。試行の大半において Fig. 4 で示すように ITI はほぼ時間的に一定となっているが、中には徐々に一定値に向かうデータも存在するため、厳密な意味では収束値とは言えない。しかし、ここでは試行の最後から 50Tap の平均を収束値として採用した。ITI の収束値の被験者ペア間平均をまとめたグラフを Fig. 7 に示す。

この図から Lag と ITI の収束値の間に線形的な関係が見て取れる。今回行った全試行中、Lag=30ms-Lag=70ms の間の ITI の収束値のペア差は最大でも 100ms 以下に収まった。実際には収束する ITI が異なるため同条件で全てを比較すべきではの収束値が大きいにも関わらず、ペア差が 50ms 以下と非常に少ないことから、より安定した領域であると考えられる。

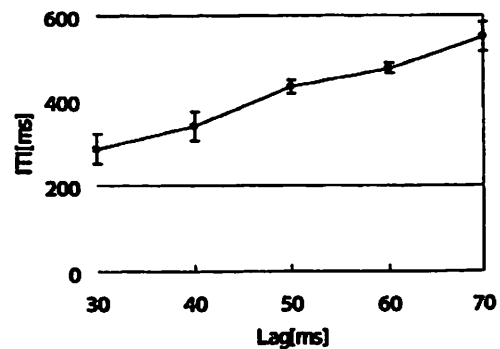


Fig. 7 Convergence value of ITI

さらに、安定領域での各被験者における SE の収束値を Fig. 8 に示す。ここで、各点における縦のバーは全被験者における SE の平均の最大値と最小値を表している。ここでも試行の最後から 50Tap の平均を収束値とした。

全ての Lag において最大値が 0 以下となり、負の非同期現象が表れているのが見て取れる。負の非同期が表れている状態は人間にとって自然なタッピング状態であり、しかも SE が 100ms 以下にはなっていないことから安定してタッピングしていると言えそうである。

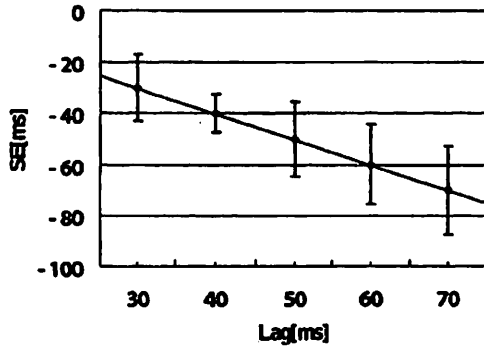


Fig. 8 Average of SE

3.4 相互相関解析とモデル推定

ここで、SE と ITI に加え、SE の変化量 (SEv), ITI の変化量 (ITIv) を以下のように定義する。

$$SE_v(n) = SE(n) - SE(n-1) \quad (4)$$

$$ITI_v(n) = ITI(n) - ITI(n-1) \quad (5)$$

このとき安定性が確認された ITI と SE の Lag 領域において、SEv-ITIv 及び SE-ITIv の相互相関係数の被験者ペア間平均を計算し Fig. 9 に示す。図の直線はプロットに対する近似直線である。

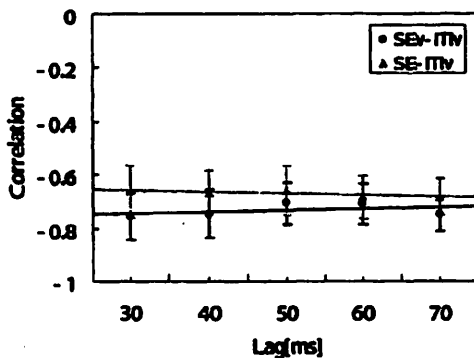


Fig. 9 Correlation coefficient of SE and ITI

このとき SEv-ITIv も SE-ITIv も Lag によってほとんど相関係数は変化せず、SEv-ITIv では $c(0) = -0.73$ 程度、SE-ITIv では $c(0) = -0.68$ 程度の比較的高い相関を取っていることがわかる。

次に、強い相関が見られた SEv-ITIv, SE-ITIv の結果を元に、時間遅れを伴う協調タッピングのモデル推定を行う。

SEv-ITIv において、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。

$$ITI_v(n) = k \cdot SE_v(n) \quad (6)$$

この式を、タップ周期 ITI と、同期誤差 SE で展開して示すと、

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

この数式がすべての n について成立すると仮定し、

$$\begin{aligned} ITI(n) - k \cdot SE(n) &= ITI(n-1) - k \cdot SE(n-1) \\ &= ITI(n-2) - k \cdot SE(n-2) \\ &\vdots \\ &= ITI(0) - k \cdot SE(0) \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$ITI(n) = p + k \cdot SE(n) \quad (9)$$

同様に、ITI-SEv において、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。

$$ITI_v(n) = h \cdot SE(n) \quad (10)$$

この式を、タップ周期 ITI と、同期誤差 SE で展開して示すと、

$$ITI(n) - ITI(n-1) = h \cdot (SE(n) - SE(n-1)) \quad (11)$$

この数式がすべての n について成立すると仮定し、

$$\begin{aligned} ITI(n) &= ITI(n-1) + h \cdot (SE(n) - SE(n-1)) \\ &= ITI(n-2) + h \cdot (SE(n) + SE(n-1)) \\ &\vdots \\ &= ITI(0) - h \cdot (SE(n) + SE(n-1) + \dots + SE(1)) \end{aligned} \quad (12)$$

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

$$ITI(n) = q + k \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) \quad (13)$$

9),(13)をまとめ、定数に $a=p+q, b=k, c=h$ を用いて記述すると、

$$ITI(n) = a + b \cdot SE(n) + c \cdot \sum_{j=1}^n SE(j) \quad (14)$$

と書ける。ここで、SE は Lag の影響を受ける(2),(3)式よりこと、および、ITI の収束値がほぼ一定の値になることから、Lag を操作することにより SE を操作でき、最終的には安定な協調タッピングを実現する ITI も操作できると言える。

今回は基本となる時間的に変動のない遅延(Lag)について扱ったが、Lag の部分を拡張することにより不規則な揺らぎを持つ遅延(Jitter)も取り扱えるようにしていきたい。

4. まとめ

今回の実験によって得られた結果をまとめる。

- Lag が小さいとき (Lag=0ms から Lag=20ms) で実験が崩壊した。
- SE の標準偏差や ITI の標準偏差の大きさが Lag=30ms から Lag=70ms 程度で小さく安定し、Lag=100 以降では特にその増加量が大きくなった。
- 安定だと思われる領域では Lag に対する ITI の収束値は線形的な傾向を取り、かつ個体差が小さくなった。
- 相関解析を元に、モデル推定を行ったところ、ITI は、累積された SE の総和とその時の SE に影響を受けるモデルが得られた。

Lag が 20ms 以下でタッピングが崩壊したことは、両被験者に存在する負の非同期現象によって ITI が相互に加速して、最終的に ITI が人間のタッピングにおける身体的限界を超えてしまったと考えられる。しかし、Lag の存在は両者の負の非同期を打ち消すため、Lag を大きくすることによりタッピングが成立するようになる。さらに Lag を大きくすると、Lag の大きさが負の非同期量を上回ることになり、収束する ITI が不安定かしてゆくものと考えられる。

0ms < Lag < 20ms 程度では、Tap 可能な ITI の範囲で、相手との位相を維持しつつ常に同期維持を考えなければならない。80ms < Lag < 100ms では、ITI の小さい範囲では同期を維持することが困難となり、ITI の大きい範囲では相手とのずれが常に大きくなり、常時大幅な位相修正を行うことになる。また、常に同期が 300ms < ITI < 550ms 程度で Tap したい場合、Lag による ITI の収束値を考えて、意図的に 30ms < Lag < 70ms (Fig. 7 参照) 程度に調整することによって自然にタイミングを合わせることが出来るようになると思われる。

そして、相関解析の結果と推定されたモデルは従来の協調タッピングモデル^[6]に Lag の影響を付加したものとすることができる。

5. おわりに

本研究では、一定の遅延が入ったシステムにおける人間同士の協調プロセスとしてのタイミング制御機構を調べるための実験系を構成した。そして、得られた結果から遅延の大きさが人間の協調作業に及ぼす影響について解析・考察を行った。

今回の実験で、Lag と ITI の間に関係があり、人間が自然にタイミングを合わせることが可能な遅延条件についてもある程度の知見を得ることができた。だが、試行自体が単純なため、実際の協調作業との繋がりという問題点がある。また、動的な解析に至らなかったという課題も残されている。今後はその点の解析を進めつつ、ネットワーク上でラグを制御することで自然な協調作業を演出するシステムを開発することを目的としていきたい。

参考文献

- [1] Thomas C. Schmidt, M. Wählisch, Hans L. Cycon and M. Palkow: Mobility Support in Real-time Video Communication, The Society for Modeling and Simulation International, 72/ 77 (2003).
- [2] N. Bouillot: The Auditory Consistency in Distributed Music Performance: A Conductor Based Synchronization, ISDM 13(0), 129/ 137 (2004).
- [3] Lazzaro, J. and Wawrzynek, J: A Case for Network Musical Performance, NOSSDAV '01, Port Jefferson NY, 157/ 166 (2001).
- [4] 引地, 森野, 福田, 松本, 瀬崎, 安田: 触覚インターフェースのネットワーク応用における遅延耐性に対する一検討, 信学技報, MVE2000-82, 17/ 24 (2000).
- [5] Y. Ishibashi, S. Tasaka and Y. Tachibana: Adaptive causality and media synchronization control for networked multimedia applications, Conf. Rec. IEEE ICC, 952/ 958 (2001).
- [6] 今, 小松, 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, 213/ 216 (2005).
- [7] Fraise P.: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J. Requein (ed), Anticipation et comportement, Centre National, Paris, 233/ 257 (1966).
- [8] Aschersleben G, Prinz W.: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, Perception & Psychophysics, 57-3, 305/ 317 (1995).
- [9] 小林, 永田, 三宅: 音楽アンサンブルにおけるタイムラグの影響, 計測自動制御学会論文集, 40-8, 876/ 878 (2004).