

同期タッピング及び交互タッピングにおける タイミング制御機構の解析と比較

東京工業大学大学院 総合理工学研究科

○朝日 健太, 三宅 美博

Analysis and Comparison of Timing Control mechanism between Synchronization Tapping and Alternation Tapping

○Kenta Asahi and Yoshihiro Miyake Interdisciplinary Graduate School of
Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Abstract: To improve cooperative process in Man-Machine interaction system, we have to investigate the cooperation mechanism between humans. We used synchronization tapping task and alternation tapping task to compare timing control mechanism. We made an experiment, measured tap-onset times, calculated synchronization error (SE) and inter tap-onset interval (ITI). We clarified that difference of temporal development of SE and ITI and correlation between SE and ITI in both task.

Keywords: Synchronization Tapping, Alternation Tapping, Communication, Timing

1. はじめに

人間はコミュニケーションを介して協調関係をリアルタイムに創り上げることができる。このような自己と環境の共創過程において重要となるのがタイミングを合わせる能力であり、対面コミュニケーションにおける両者の身振りの自発的な同調^{[1][2]}からもその重要性が伺える。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性を実現し、歩行介助や音楽コミュニケーション等のような人間の協調プロセスを支援する人工物を作ることを目指しており^{[3][4]}、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”は、その同調過程から考えて2つに分類できると考えられる。それは、音楽やダンス等に見られるタイミングを同期させるコミュニケーションと対話やテニス等に見られる交互にタイミングを取るコミュニケーションである。

このような2種類に分類された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、同期タッピング課題^[5]と交互タッピング課題^[6]がある。これらの課題は、それぞれ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、周期的な刺激と交互にタップ動作を行う課題である。

同期タッピング課題において、視聴覚・体性感覚などの外的イベントと、応答出力とをむすぶ感覚運動連関

において、周期的な音や光といった刺激に対して身体反応が数10ms前後先行する、人間のタイミング制御における予測的機構とも言える「負の非同期(Negative Asynchrony)」現象が観察されている^{[7][8][9]}。また、その誤差修正機構は刺激と応答の位相関係を維持するために重要な役割を果たしていることが報告されている^{[10][11][12][13]}。最近の研究では、二重課題法を用いた実験から、人間のタイミング機構が提示刺激周期に依存して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^[14]。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^[15]。また、より現実の環境に近い複雑な外的イベントとの同期においてもタイミング機構の二重性が関わっていると報告されている^[16]。

交互タッピング課題においても、多くの重要な知見が得られている^{[17][18]}。しかし、その不安定かつ複雑な挙動^[6]からか、未だその時間構造には不明な点が多いという問題点がある。

そこで本研究では、両課題の異なる特性を明らかにするために、同期タッピング課題及び交互タッピング課題を取り上げ比較する。特に、人間のタイミング制御において重要とされるタイミング機構の二重性という観点から、誤差修正機構との関連からフィードバック機構を調べることにより、両課題の性質の違いを明らかにすることを目標とする。

2. 実験方法

2.1 実験課題

実験 1 (同期タッピング課題) : 周期的なパルス音刺激を提示し, 被験者にはその音刺激の開始時刻に同期するように右手人差し指でボタンを押してもらう。

実験 2 (交互タッピング課題) : 周期的なパルス音刺激を提示し, 被験者にはその連続する音刺激のちょうど中間の時刻に合わせるように右手人差し指でボタンを押してもらう。

タイミング機構が提示刺激周期に依存し二重化されているという知見^[10]に基づき, タイミング機構の周期依存性を調べるために, 両課題において, 提示刺激周期 (ISI) として 600ms, 1200ms, 1800ms, 2400ms, 3000ms を与えた。

試行中は, 視覚刺激を排除するために瞑目してもらい, 身体の一部を動かしてリズムをとることと 1 周期を分割してカウントすることを禁止した。また, 両課題において, 自己のタップに対する聴覚フィードバックは与えなかった。

2.2 特徴量

記録された n 番目の提示刺激時刻を $Stim(n)$, n 番目のボタン押し (Tap) 時刻を $Tap(n)$ として, 連続するタップの時間間隔である ITI (Inter Tap-onset Interval), 目標刺激時刻とタップの時間間隔である SE (Synchronization Error) を解析の対象とした (Fig.1, Fig.2)。ここで目標刺激時刻とは, 同期タッピング課題においては提示刺激時刻のことを, 交互タッピング課題においては 2 つの提示刺激の中間時刻のことを指す。ITI (Eq.1) 及び SE (同期タッピング課題 : Eq.2, 交互タッピング課題 : Eq.3) を以下に定義する。

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

$$SE = Tap(n) - Stim(n) \quad (2)$$

$$SE = Tap(n) - \frac{1}{2} (Stim(n+1) + Stim(n)) \quad (3)$$

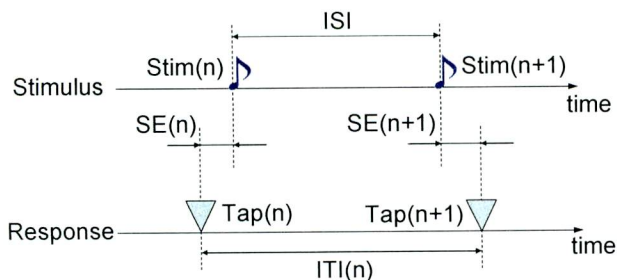


Fig.1 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap in synchronization tapping task

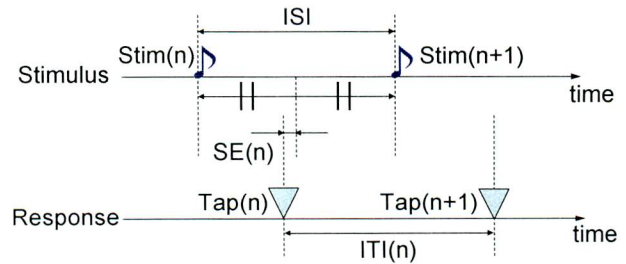


Fig.2 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap in alternation tapping task

2.3 被験者・実験環境

被験者は健常な右利きの 20 代男性 4 名にボランティアで依頼した。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。なお 4 人は, 予備的な試行を通じた習熟を行ない, 滞りなくタップ動作を行なえることを確認している。

また, 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, 歩行音, 通風音など) をできるだけ排除した静寂な環境を用意した。

2.4 システム概要

本研究では Fig.3 に示すタッピングシステムを使用した。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 の時間精度で記録した。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した。両課題共に 1 回の試行を 120Tap とし, 120Tap のうち不安定な最初の 20Tap を除いた有効 100Tap を, 実計測値として採用した。



Fig. 3 Equipment of tapping system

Fig.6 Temporal Development of SE in alternation tapping task : (a)ISI = 1200(ms), (b)ISI = 1800(ms), (c) ISI = 2400(ms)

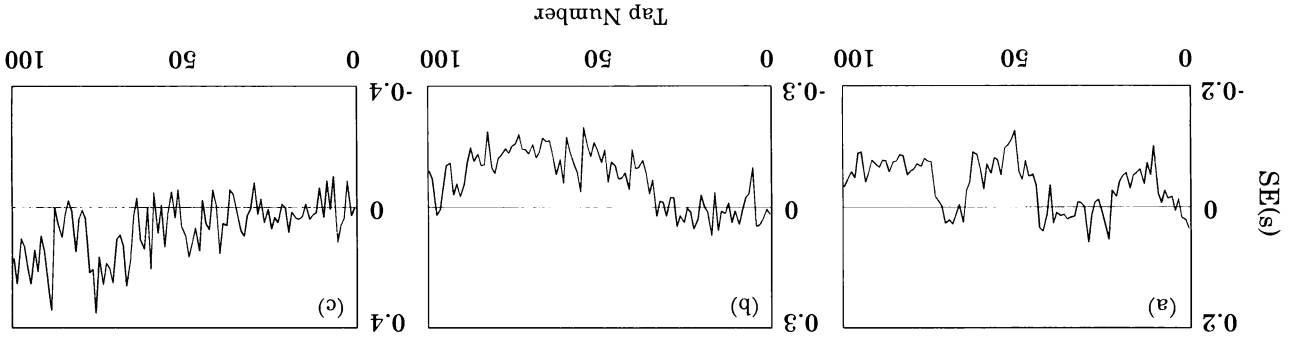


Fig.5 Temporal Development of SE : (a),(b),(c) synchronization tapping task, (d),(e),(f) alternation tapping task, (a),(b) ISI=600(ms) (c),(d) ISI = 1800(ms) (e),(f) ISI = 3000ms

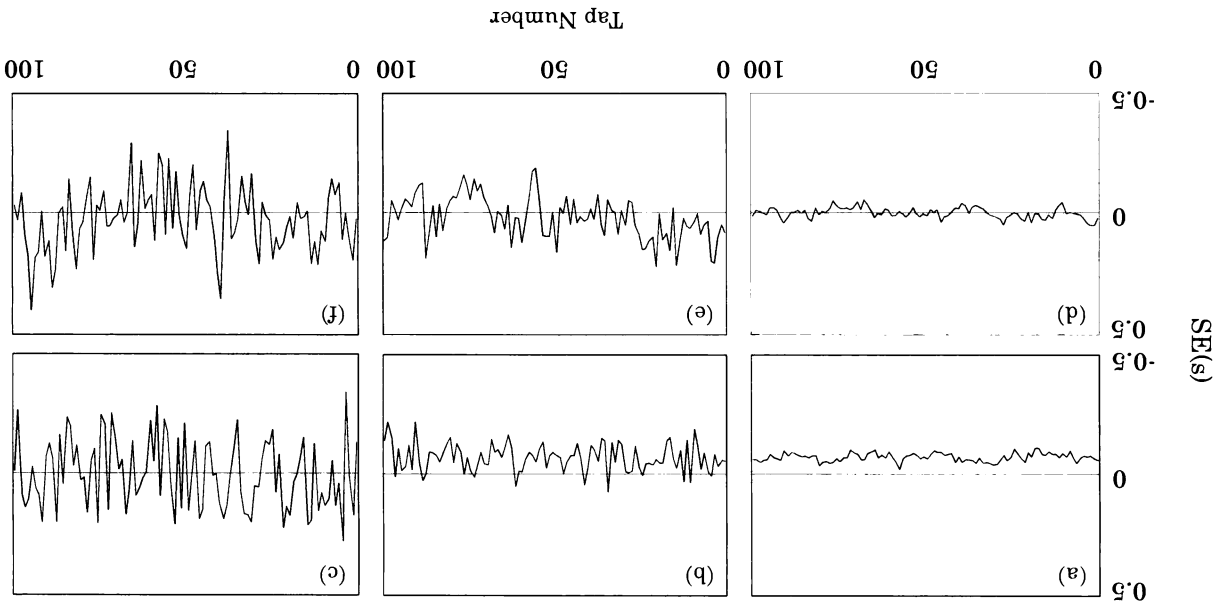
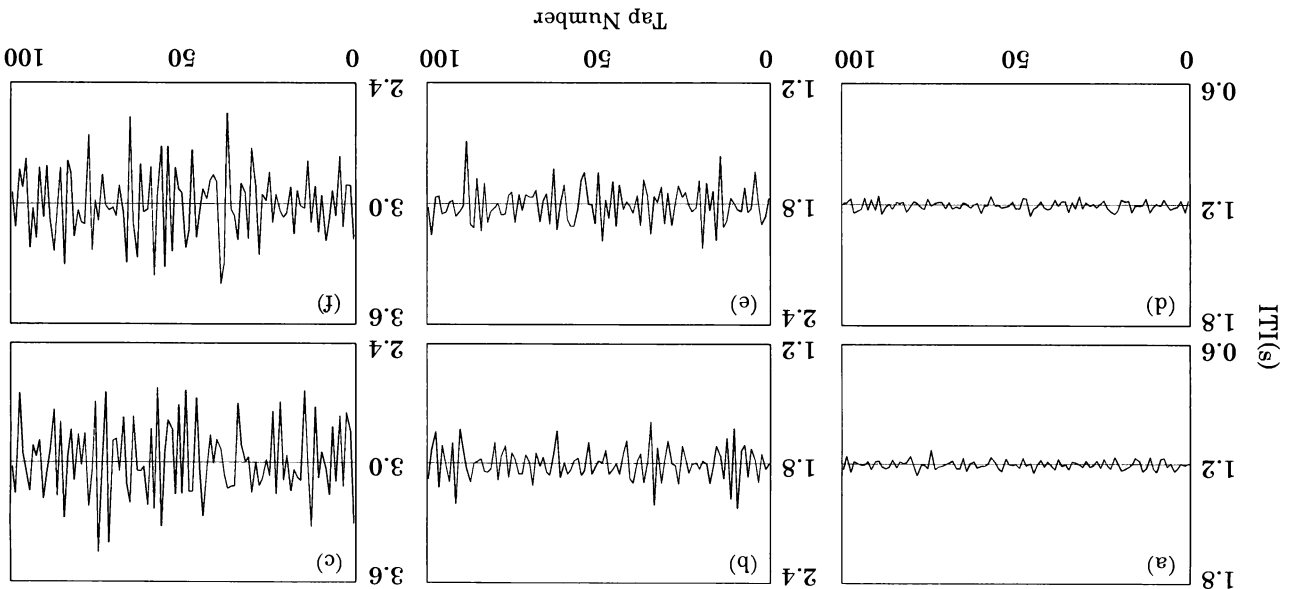


Fig.4 Temporal Development of ITI : (a),(b),(c) synchronization tapping task, (d),(e),(f) alternation tapping task, (a),(b) ISI=600(ms) (c),(d) ISI = 1800(ms) (e),(f) ISI = 3000ms



3. 実験結果

3.1 ITI 時系列

Fig.4 は ISI=600(ms), ISI=1800(ms), ISI=3000(ms)の両課題における ITI 時系列の例である。

ISI の大きさが大きくなるにつれて ITI 時系列のゆらぎが大きくなっていくことが見て取れる。また、両課題の時系列のゆらぎに大きな差が無いことも見て取れる。

3.2 SE 時系列

Fig.5 は ISI=600(ms), ISI=1800(ms), ISI=3000(ms)の両課題における SE 時系列の例である。

同期タッピング課題の ISI=600(ms)の SE 時系列は試行を通して常に負の値を取り、ISI=1800(ms)においても、試行を通してほぼ負の値を取っている。これは、音刺激に対して常にタップが先行していることを表している。この現象は負の非同期 (Negative Asynchrony) [7][8][9] と呼ばれ、人間が予測的なタイミング制御を行っていることを示唆している。また、負の非同期は身体的機構が働いていると考えられる短周期側において生じ、長周期側に推移すると共にその生起率は落ちていくことも知られており^[14]、実際に ISI=3000(ms)の時系列ではその傾向が見て取れる。交互タッピング課題においては、SE が常に負の値を取る現象は見取れなかった。

交互タッピング課題の SE 時系列は不安定な挙動を取ることがあり(Fig.6)、今回、極端なドリフトを示すデータは解析から外した。

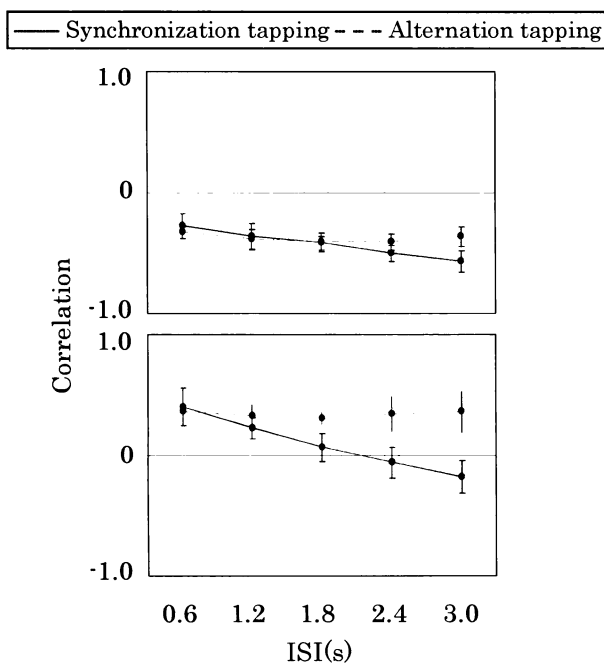


Fig.7 Auto-correlation coefficient of ITI and SE : (a)ITI , (b) SE

3.3 ITI 及び SE の自己相関

Fig.7 は ITI 及び SE の Lag1 の自己相関における相関係数を表している。

ITI の相関において、両課題は負の相関を取り、同期タッピングでは ISI を大きくすると共に相関も大きくなり、交互タッピングでは相関は ISI に依存しないことが見て取れる。

SE の相関において、同期タッピングでは短周期側では正の相関を持ち、ISI を大きくすると共に相関は減少し ISI=1800(ms)程度で相関はほぼ 0 になり、さらに ISI を大きくすると負の相関を取ることが見て取れる。交互タッピングでは正の相関を取り、ISI に依存せずほぼ一定の値を取ることが見て取れる。

3.4 SE から ITI へのフィードバック

ここで、ITI の変化量として ITI_v(Eq.4)を、SE の変化量として SE_v(Eq.5)を新たに導入する。

$$ITI_v = ITI(n) - ITI(n-1) \quad (4)$$

$$SE_v = SE(n) - SE(n-1) \quad (5)$$

タッピング課題において、刺激との位相差 (SE) から次の応答へのフィードバック機構^{[11][19]}が存在し、複数提案されているタッピングモデルにこの機構が用いられ^{[13][20][21]}、人間のタイミング制御に大きな影響を与えていることが分かる。

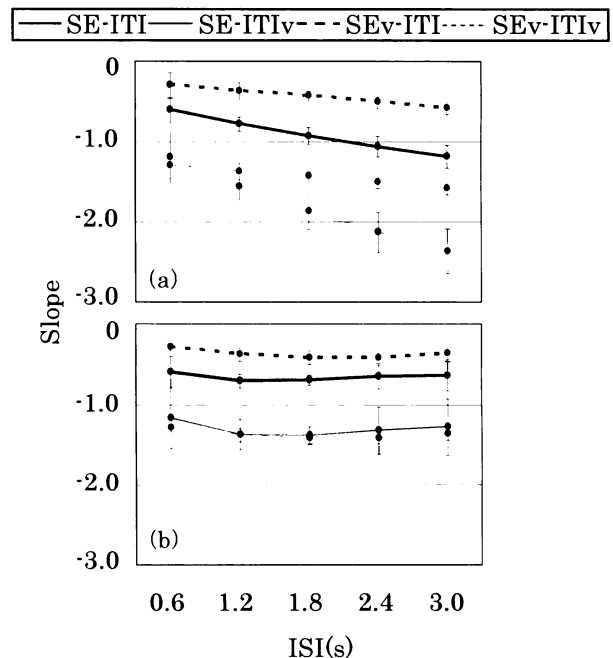


Fig.8 Slope of regression line : (a) synchronization tapping task, (b) alternation tapping task

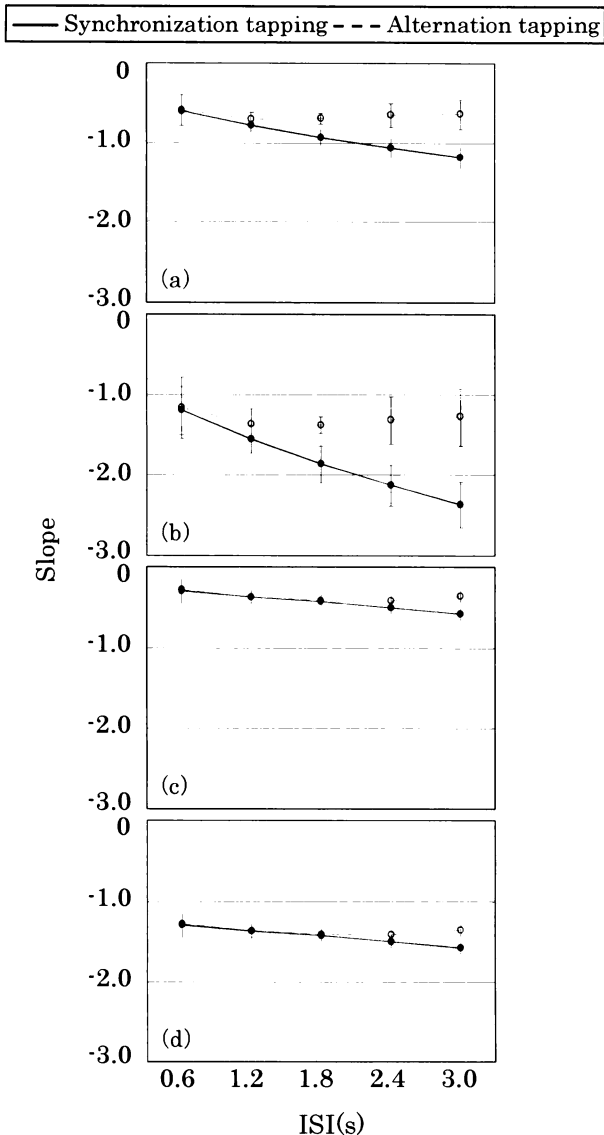


Fig.9 Slope of regression line : (a) SE-ITI, (b) SE-ITiv, (c) SEv-ITI, (d) SEv-ITiv

そこで、両課題におけるフィードバック強度を比較するために、SE-ITI, SE-ITiv, SEv-ITI, SEv-ITiv の各散布図に引くことが出来る回帰直線の傾きに注目した (Fig.8).

その結果、同期タッピング課題では提示刺激周期の大きさに従って傾きも増加し、交互タッピング課題では傾きは提示刺激周期の大きさに依存しないことが分かった。

Fig.9 はそれらを各関係毎に分けたグラフである。それぞれの関係により差はあるものの、短周期側では課題間の値に差は無く、長周期側では有意な差がある ($p < 0.05$)ということが分かった。

4. 考察

今回の実験によって得られた結果をまとめる。

- 同期タッピング課題及び交互タッピング課題を行いそのタップの時間発展を計測した。
- ITI の時間発展を見ると、両課題間で差は見られなかった。また、SE の時間発展では、同期タッピングでは負の非同期現象が観察されたが、交互タッピングでは SE が試行中常に負の値を取る傾向は観察されなかった。
- 交互タッピングにおける SE の時間発展において、非常に不安定な挙動が観察された。
- SE の自己相関を見ると、同期タッピングでは刺激周期の大きさに従って正の相関から負の相関に推移することが、交互タッピングでは相関は刺激周期に依存せず正の相関を取ることが確認された。
- ITI の自己相関及び SE-ITI, SE-ITiv, SEv-ITI, SEv-ITiv についての回帰直線の傾きを見ると、同期タッピングでは刺激周期の大きさに従って値が大きくなり、交互タッピングでは値は刺激周期に依存しないことが確認された。

交互タッピング課題では同調状態が安定せず、被験者・環境により多様な挙動を示すことは過去の知見^{[6][18]}と一致した。この原因として、日標位相である提示刺激周期の中間時刻は物理的なフィードバックで示されないため、常にその主観的な中間時刻が揺らいでいるためであると考えられる。その結果、交互タッピング課題では短周期側において、タップ時刻と主観的な刺激周期の中間時刻との間に負の非同期が発生しているにも関わらず、実際の物理時間で考えたためその現象が見られなかったと思われる。

SE の自己相関の結果において、同期タッピング課題では位相に関するタイミング制御が刺激周期の大きさに従って変わっていて、 $ISI = 450 \sim 1500 \text{ms}$ の SE 変動自体に含まれるフィードフォワード性を示すという報告^[14]と一致する。さらに、ITI, SE の自己相関及び相互相関の結果から、同期タッピング課題ではそのフィードバック強度が周期の大きさにより変化することが、交互タッピング課題ではフィードバック強度が刺激周期に依存しないことが見て取れる。同期タッピング課題においては、2重化されたタイミング予測機構^[14]において、身体的機構の働きと認知的機構の働きの重みが刺激周期により変化している可能性が示唆される。交互タッピング課題では刺激周期によらず両機構が一定の働きを見せている可能性が考えられる。

短周期側におけるタイミング制御には自動的な機構

において重要な役割を果たす小脳との関連^{[22][23][24]}が示唆される。しかし、交互タッピング課題においては単純な身体的機構では説明のつかない部分が表れていると考えられる。

タイミングを同期させるコミュニケーションでは、すぐに環境もしくは他者と同調していく^[25]が、交互にタイミングを取るコミュニケーションでは、様々な過程を通った上での同調する^[26]。今回の結果は、このような現実のコミュニケーションともつながっていると考えられる。

5. まとめ

本研究は、コミュニケーションにおいて重要である同期及び交互のタイミング制御を考えるために、同期タッピング課題と交互タッピング課題のタイミング機構の比較を行うものであった。

そしてその周期と位相差の時間発展と相関解析により、両課題のタイミング制御機構における共通点と相違点を見出した。

実際のコミュニケーションを考えると、同期課題では、刺激周期やリズムに強く影響を受けると共に、与えられる環境と一体化するようにタイミングを合わせることから、個人・状況に依存しにくい挙動が観察されたと考えられる。また、交互課題では、同期課題と比較して刺激周期やリズムによる影響が弱く、自由度が高いため、個人差や時間による挙動の変化が表れ易かったと考えられる。

交互課題における非定常な過程というのは、コミュニケーションにおける同調状態の変化を生んでいる可能性がある。そして、似た挙動を持つ個人同士ではより同調しやすい等の影響も考えられる。この非定常な過程がどのような機構から生じているのか、その機構が実際のタイミング制御にどのように影響を与えているのかという問題を今後明らかにしていきたい。

参考文献

[1] Condon, W.S., Sander L.W.: Neonate Movement is Synchronized with Adult Speech, *Science*, Vol.83, 99/101 (1974).
[2] 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).
[3] 武藤剛, 三宅美博: 歩行介助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, vol.40, no.8, 873/875 (2004).
[4] 小林洋平, 三宅美博: 相互引き込みモデルを用いたアンサンブルシステムの開発, 自動計測制御学会論文集, vol.40, No.9, 948/957 (2004).
[5] Dunlap K.: Reaction to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize, *Psychological Review*, Vol.17, 399/416 (1910)
[6] Kelso, J.A.S., DelColle, J. & Schönner, G.: Action- Perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and Performance XIII*, Hillsdale, NJ: Erlbaum, 139/169 (1990).
[7] L.T. Stevens: On the time sense, *Mind*, Vol.11, 393/404 (1886).

[8] P.Fraisse: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin(Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/257 (1966).
[9] G.Aschersleben and W.Prinz: Synchronizing actions with events : The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, Vol.57, No.3, 305/317 (1995).
[10] Vorberg, D., Wing, A.: Modeling variability and dependence in timing. (Heuer H., Keele S.W., Eds), *Handbook of perception and action 2*, 181/262, Academic Press, London (1996).
[11] Hary, D., & Moore, G.P.: Synchronizing human movement with an external clock source, *Biological Cybernetics*, Vol.56, 305/311 (1987).
[12] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: I. Timing and error corrections, *Biological Cybernetics*, vol.70, 463/473 (1994a).
[13] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: II. Stability analysis, error estimation and simulations, *Biological Cybernetics*, vol.70, 475/484 (1994b).
[14] Miyake, Y., Onishi, Y. & Poeppel, E., "Two types of anticipation in synchronous tapping," *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, vol.64, 415/426 (2004).
[15] 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, Vol.39, No.10, 952/960 (2003).
[16] 武藤ゆみ子, 三宅美博, エルンスト・ペッペル: 外乱を含む同期タッピング課題における認知が運動に与える影響, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 講演会予稿集, 289/294 (2006).
[17] Kelso, J.A.S., Bressler, S.L., Buchanan, S., DeGuzman, G.C., Ding, M., Fuchs, A., Holroyd, T.: A phase transition in human brain and behavior, *Physics Letters A*, Vol.169, 134/144 (1992).
[18] Ding M, Chen Y and Kelso JAS.: Statistical analysis of timing errors; *Brain Cogn*, Vol.48, 98/106 (2002).
[19] 今誉, 三宅美博: 協調タッピングにおける相互同調過程の解析とモデル化; ヒューマンインタフェース学会論文集, Vol.7, No.4, 61/70 (2005).
[20] Repp B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization; *Human Movement Science*, vol.20, 277/312 (2001).
[21] Thaut, M.H. & Kenyon, G.P.: Rapid motor adaptations to subliminal frequency shifts in syncopated rhythmic sensorimotor synchronization, *Human Movement Science*, Vol.22,321/338 (2003).
[22] R.Ivry: The representation of temporal information in perception and motor control, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol.6, 851/853 (1996).
[23] R.Ivry: Neural mechanisms of timing, *Trends in Cognitive Science*, Vol.15, 163/169 (1997).
[24] A.Pascual-Leone: Increased variability of paced finger tapping accuracy following repetitive magnetic stimulation of the cerebellum in humans, *Neuroscience Letters*, Vol.306, No.1-2, 29/32 (2001).
[25] 渥美将利, 三宅美博, 國見ゆみ子, 野村進, 別府政敏: 歩行介助システム Walk-Mate の時間的・運動力学的な有効性評価, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.4, 380/382 (2005).
[26] Yoshida, M. & Miyake, Y.: Relationship between utterance dynamics and pragmatics in the conversation of consensus building process, *Proc. of the 15th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN2006)*, Hatfield, U.K., 641/645 (2006).