

2種類の協調タッピング課題における相互同調過程の解析

朝日 健太^{*1} 中島 壮人^{*1} 三宅 美博^{*1}

Analysis of Mutual Synchronization Process in Two Types of Cooperative Tapping Task

Kenta Asahi^{*1}, Masato Nakajima^{*1} and Yoshihiro Miyake^{*1}

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

Keywords: synchronization cooperative tapping, alternate cooperative tapping, mutual synchronization

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^[1,2]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^[3-5]。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^[6,7]や、時系列データ解析によるダイナミクス^[8]の推定^[8]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^[9,10]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ける、モデルの推定とそれを基にした人間-機械系の再構築^[9]、交互

協調タッピング課題におけるモデル推定^[10]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。しかし、両課題の間のタイミング同調過程を比較した知見は未だ無い。そこで本研究では同期協調タッピング課題及び交互協調タッピング課題に注目し、両課題の間におけるタイミング機構を比較し、共通する点と相異なる点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

・ 同期協調タッピング課題

実験は2人の被験者から構成され、一方の被験者のタップを他方の被験者のタップにできる限り同期するように課題を与える。ただし、予備実験により、この課題のみでは両被験者のタップが徐々に加速し、最終的には被験者のタップが止まってしまい実験が成立しないことがある。そこで、被験者のタップの加速を避けるため、実験開始直後の20Tap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、その後21Tap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。それ以降、被験者には20Tap目までに提示した刺激周期を主観的に維持するようタップする指示を与える。

・ 交互協調タッピング課題

実験は2人の被験者から構成され、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。実験開始直後の20Tap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、その音刺激と交互にタップする指示を与える。これをStage1とする。その後21Tap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。

*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

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。

同期協調タッピング課題、交互協調タッピング課題共に、ボタン押し動作は右手人差し指で行ってもらう。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

・ 同期協調タッピング課題

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 (図1)。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。

・ 交互協調タッピング課題

Stage1 における特徴量を図 2(a) に、Stage2 における特徴量を図 2(b) 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。

$$SE_A(n) = Tap_B(n) - \frac{Tap_A(n-1) + Tap_A(n)}{2} \quad (3)$$

$$ITI_A(n) = Tap_A(n) - Tap_B(n) \quad (4)$$

SE は一方の被験者の連続するタップの中間時刻が他方の被験者のタップ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タップすれば SE は 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。タップがそれより早ければ負の値、遅ければ正の値となる。

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、全組み合わせである計 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、歩行音、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。

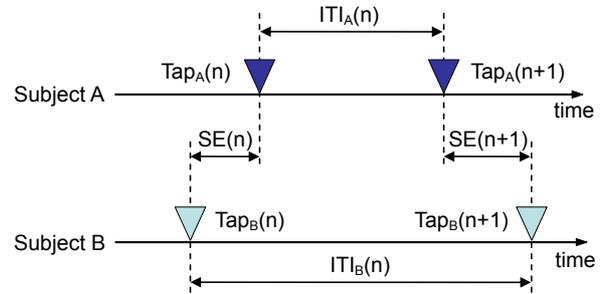


図1 同期協調タッピング課題における時系列
Fig. 1 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap in synchronization cooperative tapping task

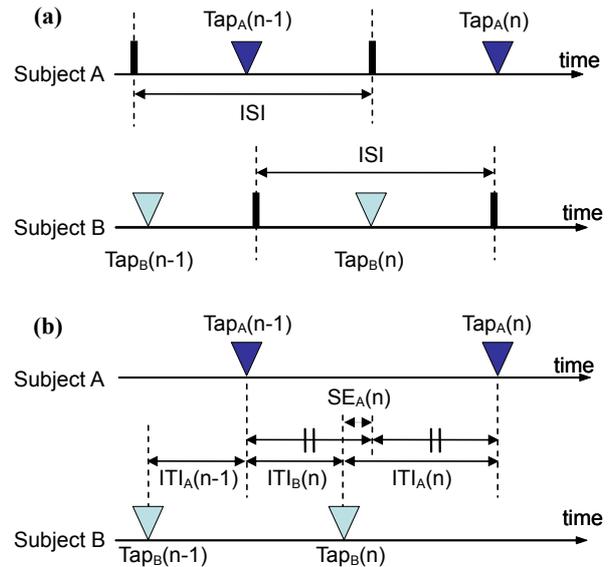


図2 交互協調タッピング課題における時系列と特徴量
Fig.2 Timing-Chart of temporal relationship between each subject's tap in alternate cooperative tapping task



図3 協調タッピング装置
Fig. 3 Equipment of cooperative tapping system

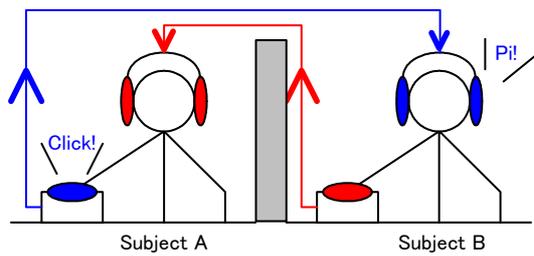


図4 クロスフィードバックタッピングシステム

Fig.4 Cross-Feedback tapping system

2.4 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(図3)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(図4)。両者のTap時刻は平行ポートを介して、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。

2.5 実験手順

両課題共に、個々の試行において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。今回は比較のために、同期協調タッピング課題ではISI=1000ms, 交互協調タッピング課題ではISI=2000ms, すなわち、両課題共に被験者がITI=1000msに合わせるような刺激周期ISIを定めた。このとき各試行において、被験者には300回タップしてもらう。ISIを固定する20Tapとその直後の20Tap, 最後の10Tapを除いた250Tapを有効データとして解析に用いる。

3. 実験結果

3.1 SEとITIの時間発展

SEとITIの時間発展の例を図5に示す。ITIについて見ると、同期協調タッピング課題では、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。一方、交互協調タッピング課題では、片方の被験者のITIがほぼ一定に推移しているのに対し、もう一方の被験者のITIは時間の経過と共に徐々に周期が大きくなっていることがわかる。SEについて見ると、ITIの場合と同様に、時間の経過と共に両被験者の間に偏りが生じてくるが見取れる。

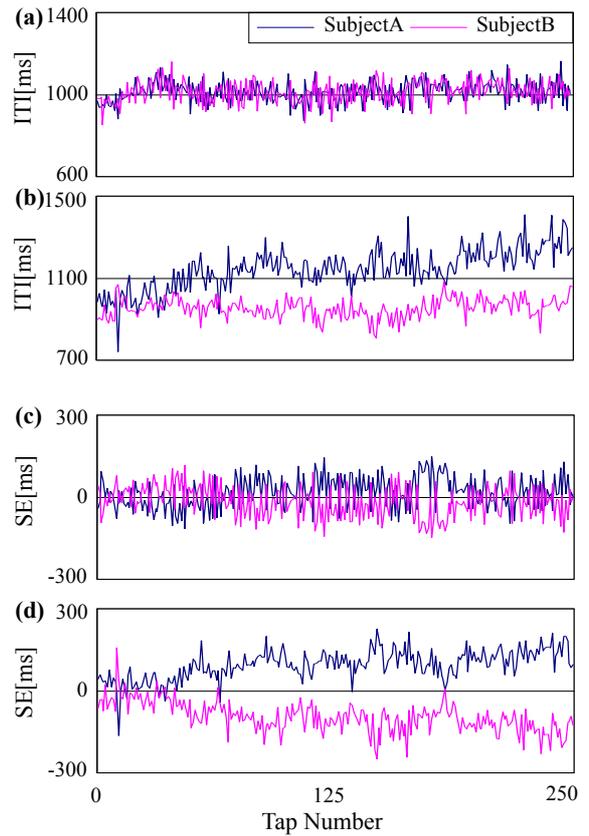


図5 SE, ITIの時間発展((a),(b): ITI. (c),(d): SE. (a),(c): 同期協調タッピング. (b),(d): 交互協調タッピング)

Fig.5 Temporal Development of SE and ITI ((a),(b): ITI. (c),(d): SE. (a),(c): synchronization cooperative tapping. (b),(d): alternate cooperative tapping)

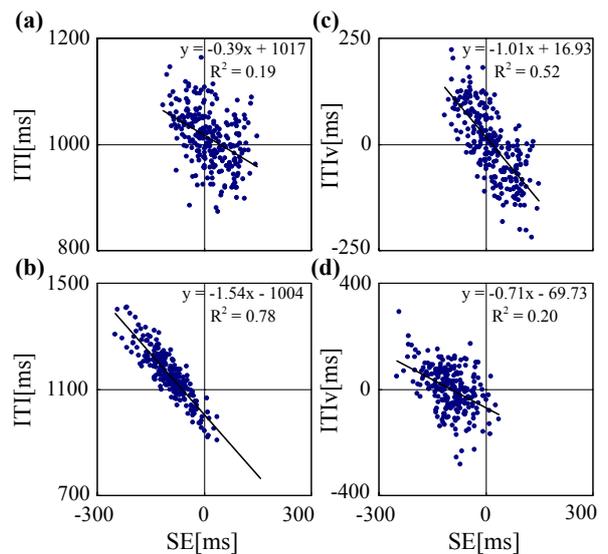


図6 SE-ITI及びSE-ITIvの散布図((a),(b): SE-ITI. (c),(d): SE-ITIv. (a),(c): 同期協調タッピング. (b),(d): 交互協調タッピング)

Fig.6 Scatter Plot, SE and ITI, SE and ITIv((a),(b): SE-ITI. (c),(d): SE-ITIv. (a),(c): synchronization cooperative tapping. (b),(d): alternate cooperative tapping)

3.2 SE と ITI の散布図

両課題共に、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_v)の関係について相関を調べる。このとき ITI_v は以下のように定義した。

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

同被験者同士により 1 試行より得た、両課題における SE と ITI, SE と ITI_v の散布図を図 6 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、負の相関があることを意味している。近似直線の R² 値を見ると、同期協調タッピング課題では SE-ITI_v に、交互協調タッピング課題では SE-ITI に、特に強い相関があることが推測される。

4. 考察

今回の実験によって得られた結果をまとめる。

- 同期協調タッピング課題及び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した。
- SE と ITI の時間発展を見ると、同期協調タッピング課題では被験者間に差が見られず、交互協調タッピング課題では被験者間に、時間と共にその大きさが変化するような差が見られることを観察した。
- 両課題において SE と ITI, SE と ITI_v の間に、それぞれ負の相関が観察された。
- 同期協調タッピング課題では SE と ITI_v の間に、交互協調タッピング課題では SE と ITI の間に、それぞれ特に強い相関が観察された。

同期協調タッピング課題における SE と ITI の時間発展では、両被験者の間に差が見られなかった。一方、交互協調タッピング課題では、SE と ITI の両方で、両被験者の間に差が見られた。この差を生じさせた原因として、両被験者の主観時間の違いが考えられる。Stage1 では一定の音刺激が与えられるために、両被験者ともほぼ一定の周期(1000ms)でタップすることが出来るが、Stage2 に移行すると時間の経過と共に主観的な周期が 1000ms から変化してしまったと考えられる。さらに、相手のタップは音刺激として自分に返ってくるのに対し、自分のタップに対するフィードバックは実質無いと言える。この差により、主観的な自分の ITI と相手の ITI が、実際の ITI とずれてしまったことも考えられる。

SE と ITI, SE と ITI_v の間の相関に関する結果は過去の知見とほぼ一致した^[9,10]。さらに、両課題における相関の違いは、相関解析により推測されたモデル^[9,10]より、同期

協調タッピング課題ではタイミング機構における履歴性が強く、交互協調タッピング課題ではリアルタイム性が強いということが考えられる。

5. まとめ

本研究では、2 種類の間人同士の双方向的なタイミング制御機構を比較するために、同期協調タッピング課題と交互協調タッピング課題を行った。そしてその周期と誤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。

人間の協調作業には、音楽アンサンブルなどの同時作業と会話のやりとりなどの交互作業がある。どちらも人間同士のタイミング共有機構として広く観察され、これらの間の関係を明らかにすることは非常に重要である。今後は、両課題のダイナミクスの比較を行い、同時作業と交互作業の関係性を明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] L.T.Stevens: On the time sense: Mind; **Vol.11**, pp.393 - 404 (1989).
- [2] G. Aschersleben and W. Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information; Perception & Psychophysics, **Vol.57**, No.3, pp.305 - 317(1995).
- [3] Hary, D., Moore, G.P.: Synchronizing human movement with an external clock source; Biological Cybernetics, **Vol.56**, pp.305 - 311(1987).
- [4] Haken, H., Kelso, J.A., Bunz, H.: A theoretical model of phase transitions in human hand movements; Biological Cybernetics, **Vol.51**, No.5, pp.347 - 356(1985).
- [5] Thaut M.H., Schause, L.M.: Weakly-coupled oscillators in rhythmic motor synchronization; Proceedings of the Society for Neuroscience, Abstract #298, **Vol.20**(1997)
- [6] Miyake, Y., Onishi, Y. & Poeppl, E.: Two types of anticipation in synchronous tapping; Acta Neurobiologiae Experimentalis, **Vol.64**, pp.415 - 426 (2004).
- [7] 三宅, 大西, ペッペル: 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, **Vol.38**, No.12, pp.1114 - 1122 (2002).
- [8] 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**, No.10, pp.952 - 960 (2003).
- [9] 今, 三宅: 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誌, **Vol.7**, No.4, pp. 61 - 70(2005).
- [10] 中島, 三宅: 交互協調タッピングの相互相関解析に基づくモデル化; 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 277 - 282 (2006).