

同期タッピングにおける二重化されたタイミング機構の解析

下茂 博章* 野島 満春* 三宅 美博*

Analysis of Dual Timing Control Mechanism in Synchronization Tapping

Shimo Hiroaki*, Mituharu Nojima* and Yoshihiro Miyake*

Abstract - We clarify internal phase correction mechanisms affecting timing control in a synchronization tapping task. Synchronization error (SE) was directly controlled with 900 ms of the inter stimulus onset interval (ISI) with our experimental method. Two types of internal phase correction mechanism became evident. The first showed a strong negative correlation between SE change and change in inter tap onset interval (ITI), suggesting a simple negative feedback mechanism. The second type was inhibited in a dual task condition. These results suggest that there are two types of internal phase correction mechanism.

Keywords: timing control, synchronization tapping, phase correction, attentional resources

1. はじめに

人間は変化しつづける動的環境に適応しつつ生活している。その適応機構の時間的側面に深く関与しているのがタイミングを合わせる能力である。その能力の重要さは、音楽やキャッチボールはもちろん、会話などのコミュニケーションを考えても明らかである。実際、対話において身振りが自然に同調することが知られている^[1]。このように、高度なタイミング機構は他者との共同作業やコミュニケーションを円滑に達成するうえでも重要な役割を担っているものと考えられる。

人間の協調プロセスを共創的に支援しうる人工物をめざすわれわれの研究グループは、このようなタイミング機構に注目し、新たなインターフェース技術として活用することを目標として研究を進めている^{[2][4]}。具体的には同期タッピング課題という実験を用い、人間のタイミング制御機構が認知的プロセスと身体的プロセスに二重化されている事を明らかにしてきた^[5]。ここで、同期タッピング課題とは、被験者にリズム音としての刺激を入力しその応答としてのボタン押し（以後、タップと記す）を同期させる心理学的実験である。この課題は人間のタイミング機構の解析に広く用いられており、さまざまな研究がこれまでになされてきた。しかし、タイミング制御システムとしてはまだ十分には解明されておらず、残されている大きい問題点として以下の2つがある。

まず、タイミング機構そのものに関する問題が残されている。同期するには位相と周期の両方がそろふ必要があるため、同期タッピング課題では位相誤差訂正と周期誤差訂正が行われていると考えられている。このような観点から、誤差訂正機構について様々なモデルが提案されてきた。現

在提案されている多くの誤差訂正モデルの基になったのが以下の式(1)および(2)で示される Mates のモデルである^[6]。ここで α 、 β は係数であり、 S は音刺激を知覚した時刻、 R はタップ動作が開始された時刻になっている。また、 Tk は内的に保持・更新されている周期“タイムキーパー”であり、 e はタップしたと知覚された時刻と音刺激が知覚された時刻の差、つまり内的なタップ時刻と刺激提示時刻の非同期量である。

$$Tk(n) = Tk(n-1) - \beta[Tk(n-1) - \{S(n) - S(n-1)\}] \quad (1)$$

$$R(n+1) = R(n) + Tk(n) - \alpha e(n) \quad (2)$$

式(1)、(2)からわかる通り、 R に対して、単純な負のフィードバックである位相訂正と周期訂正とが結合される形で構成されている。

しかし、このモデルに問題点が存在することが最近明らかになってきた。三宅らはタイミング制御と注意の関係を調査するために、観察対象とする課題と同時に注意資源を消費する課題を与え、挙動の変化を観察する手法である二重課題法を用いて同期タッピング課題を行った^[5]。その結果、タイミング制御機構に注意資源が関与していることが示唆された。さらに高野らは注意が誤差訂正機構においてどのような役割を担っているのかを明らかにするため、位相誤差を直接制御する実験を行い、二重課題法を用いてその挙動の変化を観察した^[7]。その結果、位相誤差訂正機構には、単純なフィードバックで記述できる注意資源を必要としない機構と、単純なフィードバックでは記述できない注意資源を必要とする機構が共存することを示した。これらの知見から、単純なフィードバックのみで構成される Matesモデルは、もはやタイミング制御の誤差訂正機構を完全に再現するものではない。

また、もう一つの問題点として、実験手法に関する問題がある。これまでは誤差訂正機構を解析するために、刺激周期を制御する実験や、刺激とタップの位相差を制御する

*: 東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻
*: Tokyo Institute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Department of Computational Intelligence and System Science

実験が行われてきた^{[8]-[9]}。しかし、最も重要と考えられる位相誤差そのものを直接制御する研究がほとんど行われていないという現状がある。

本研究は、上記の2つの問題点の解決をめざすものである。つまり、位相誤差を直接制御できる実験系を開発することと、二重課題法を用いて注意からの影響を評価することによって、注意がタイミング制御の誤差訂正機構においてどのような役割を担っているかを明らかにすることを目標とする。われわれは、これまでこのような観点から研究を進めてきたが^{[5],[7]}、本発表ではその現状を報告する。具体的な方法については以下に記述する。

2. 方法

2.1 パラメータの定義

記録された n 番目の刺激時刻を $S(n)$ 、 n 番目のタップ時刻を $R(n)$ として、刺激周期である ISI(Inter Stimulus-onset Interval)、連続するタップの時間間隔である ITI(Inter Tap-onset Interval)、刺激時刻に対するタップ時刻の時間差である SE(Synchronization Error)を以下の式(3)~(5)のように定義した。

$$ISI(n) = S(n+1) - S(n) \quad (3)$$

$$ITI(n) = R(n+1) - R(n) \quad (4)$$

$$SE(n) = R(n) - S(n) \quad (5)$$

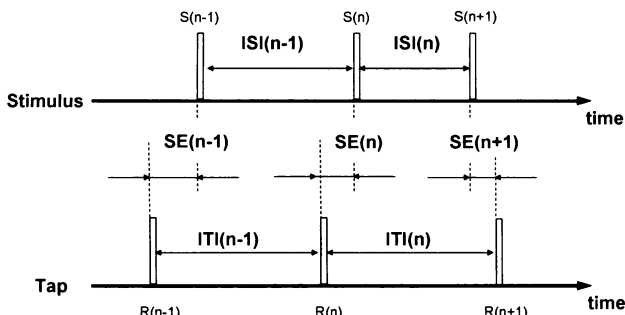


図1 同期タッピングのタイミングチャート

Fig.1 Timing-chart of temporal relationship between taps and auditory stimuli

2.2 実験方針

本研究では、同期タッピング課題における位相誤差訂正機構の解析を目的としている。そのために、SEを制御し、被験者の応答を観察する。

また、この実験を行う上で重要な現象が観察されている。それは、同期タッピング課題において、周期的な刺激に対して身体反応が数10ms程度先行する“負の非同期(Negative Asynchrony)現象”と呼ばれる現象である^[10]。この現象は、認知的同期と物理的な同期の間にずれが存在することを示している。上述した Mates モデルが知覚上の変数を用いているのもこのためである。

つまり位相誤差訂正機構の解析をするためには、知覚上の位相誤差を制御する必要がある。そのために、本実験は

同期タッピング課題を3つのフェーズに分けて行う。第1フェーズでは、被験者の知覚上の時間と物理的時間のずれであるSEを観察し、その大きさを計測する。第2フェーズでは、得られたSEと等しい値でSEを制御することにより強制的に知覚上の位相誤差を0にする。第3フェーズでは、第2フェーズで制御していたSEの値から ΔSE だけ変化させた値でSEを制御し、知覚上の位相誤差 ΔSE を与える。

つまり本実験ではこの ΔSE を制御することで知覚上の位相誤差を直接制御し、位相誤差訂正機構を観察する。また、認知に関わる注意資源からの影響について観察するため二重課題法を用いてその挙動の変化も観察する。

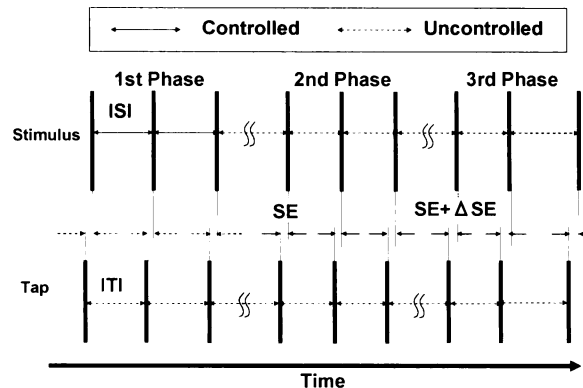


図2 実験の概念図

Fig.2 Experimental image

2.3 実験手順

被験者には提示された聴覚刺激に可能な限りタイミングを合わせてタップする、という同期タッピング課題が与えられている。タップ動作は右手人差し指で行ってもらった。実験中は右手人差し指以外の体の部位を使ってリズムを取ることは禁止した。

1試行を80タップとして、最初の5タップを除く75タップをデータとして採用した。75タップを、最初の15タップ、中間の20タップ、最後の40タップの3つのフェーズに分ける。

第1フェーズではISIを固定した状態(以後、FISI条件と記す)で同期タッピング課題を行う。

第2フェーズでは、SEを固定した状態(以後、FSE₁条件と記す)で同期タッピング課題を行う。このとき与えるSEの大きさをSE₁とし、以下の式(6)で定義する。SE₁の値はFISI条件下で得られた15タップのSEの平均であり、その値はFISI条件の15タップが完了した時刻に計算される。

$$SE_1 = (\text{mean SE in the FISI condition}) \quad (6)$$

第3フェーズにおいても、SEを固定した状態(以後、FSE₂条件と記す)で同期タッピング課題を行う。このとき、与えるSEの大きさをSE₂とし、以下の式(7)で定義する。SE₂の値はSE₁から ΔSE だけ変化させたものである。

$$SE_2 = SE_1 + \Delta SE \quad (7)$$

ISI は 900ms で、制御する ΔSE は -150~150ms の範囲で $\Delta SE \in \{-150, -120, -90, -60, -30, 0, 30, 60, 90, 120, 150\}$ の 11 通りで制御した。

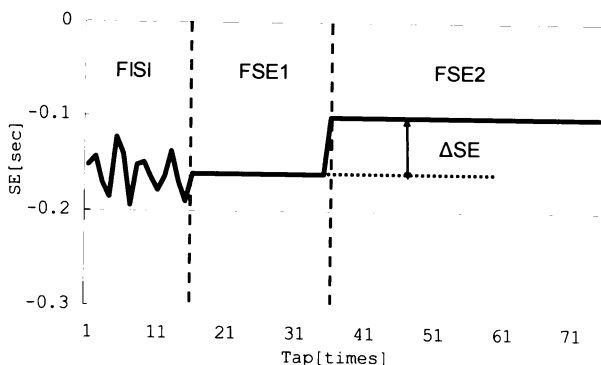


図3 SE の時間発展
Fig.3 Temporal development of SE

本研究では上記の同期タッピング課題のみを行う Single 条件と、上記の同期タッピング課題と共に黙読課題を行う Dual 条件の二種類の条件のもとで行った。Single 条件では、被験者は瞑目状態で課題を行った。Dual 条件では、PC 上で表示した文章をスクロールし、それを黙読させるという手法を用いた。被験者の注意が文章の意味理解に向いていたことを確認するため、各試行終了後に文章の内容に関する二択形式のテストを行った。黙読課題には、日本語で書かれた Robert Louis Stevenson 著「宝島」を用いた。

2.4 被験者

課題を遂行する被験者は、ボランティアとして 20 代男子 3 名(21-24 歳、平均年齢 23 歳)に依頼した。被験者はいずれも音刺激を聴き取るにあたっての障害が無く、かつ右利きで、応答のタップ動作は右手人差し指にて行なった。なお被験者は同様なタッピング実験において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。

2.5 実験システム概要

タッピングシステムは PC(IBM, Thinkpad535)上のシングルタスク OS(IBM, PC-DOS200)に C 言語を用いて実装された。Tap 時刻は同様の PC を用い、パラレルポートを介して 1/1024s の時間精度で記録した。設定した時間分解能が得られていることは確認を行った。提示音刺激は、500Hz 矩形波を 100ms 間、イヤホンによって被験者の両耳に提示した。音量は、主観的に聴き取り易い範囲で一定に設定した。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をできるだけ排除するため静かな環境を用意し、さらに、遮音性の高いイヤーマフを使用した。

また、Dual 条件では PC(IBM, ThinkpadR50e)を用い、ブラウザ(Firefox2.0.0.4)上で文章を表示させた。各被験者の

黙読速度を調査した上で、注意資源を消費するのに適切なスクロールの速さを設定した。

3. 結果

3.1 SE および ITI の時間発展

図 4 に Single 条件、ISI=900ms、 $\Delta SE=150$ ms で行われた実験を例に、ITI の時間発展を説明する。FSE₁ 条件での ITI の挙動を観察すると、FISI 条件から ITI の大きさはほぼ変化せず、かつ挙動も安定している。このことから、FSE₁ 条件下で、知覚上の位相誤差を 0 にすることに成功していると考えられる。また、FSE₂ 条件での ITI の挙動を見ると、FSE₁ 条件下に比べて減少している。これは知覚上の位相誤差 $\Delta SE=60$ ms を与えたため、知覚上では音刺激に対してタップが遅れた状態となり、それを修正するためにタップを早めた結果であると考えられる。 ΔSE が負の場合についても同様の考え方で結果を説明できる。つまり、ITI の変化は被験者の知覚上の時間変化に対する応答であると推測できる。このことから以降は FSE₁ 条件から FSE₂ 条件へ遷移したときの、SE 変化(ΔSE)に対する被験者の応答の変化(ΔITI)を観察していく。ここでの ΔITI は式(8)のように定義されたものである。

$$\Delta ITI = (\text{mean ITI in the FSE}_2 \text{ condition}) - (\text{mean ITI in the FSE}_1 \text{ condition}) \quad (8)$$

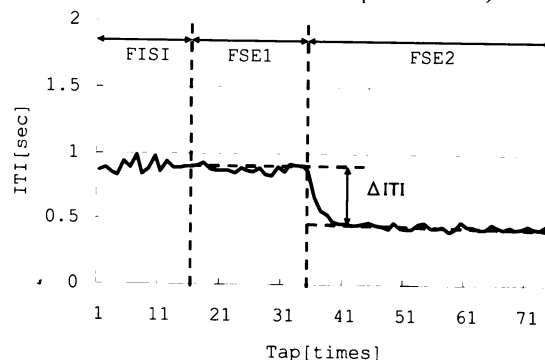


図4 ITI の時間発展
Fig.4 Temporal development of ITI

3.2 相関解析

図 5 は ΔSE を横軸に ΔITI を縦軸にとり、ある被験者が行った実験結果を 2 回分重ねてプロットしたものである。Single 条件はおおよそ 3 つの集団に分けられ、一方 Dual 条件は 1 つの集団しか現れなかった。また、Dual 条件に比べて Single 条件では、 ΔITI が広範囲に分布している。

まず、実線で囲まれた部分を見てわかるように、Single 条件、Dual 条件共にほぼ原点を通る直線上にプロットが集中している。以後、この集団を集団 1 と記す。集団 1 においては、 ΔSE に対して ΔITI が強い負の相関を持っていることが示されている。

次に Single 条件の ΔSE の正側において破線で囲まれている部分に注目する。以後、この集団を集団 2 と記す。集団 2 は、原点から正側に大きく離れた場所に出現し、Dual

条件では抑制されている。

最後に Single 条件の ΔSE の負側において破線で囲まれている部分に注目する。以後、この集団を集団 3 と記す。集団 3 は、原点から負側に大きく離れた場所に出現し、Dual 条件では出現しない。

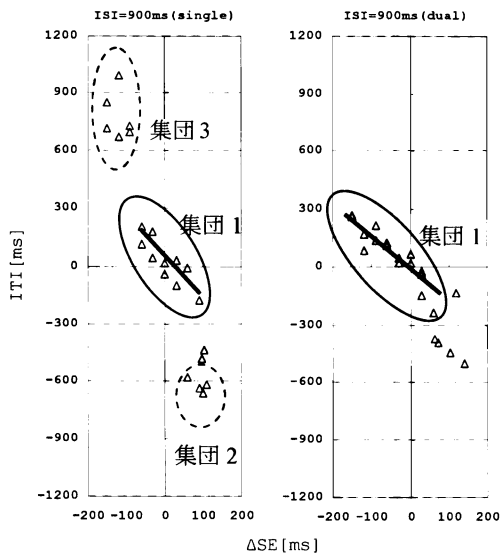


図 5 Single 条件と Dual 条件における ΔSE - ΔITI 応答
Fig.5 Relationship between ΔSE and ΔITI
under single task condition and dual task condition

4. 考察

図 5 を見ると、集団 1 は原点を通る直線上に位置し、負の相関を持つことがわかる。また、Single 条件と Dual 条件の両方で観察される。このことから集団 1 は、高野らがクラスタ 1 として示唆した、単純なフィードバックで記述できる注意資源を必要としない機構と一致すると考えられる。また、集団 1 は知覚上での音刺激とタップの同期を維持するためのフィードバック機構であると考えられ、上述した Mates モデルの位相誤差訂正機構における負のフィードバック機構と一致する。

また集団 2 については、Single 条件と比べて Dual 条件では抑制されていることから、その生成には注意資源が関与していると推定される。さらに集団 1 が描き出す、傾きが負で原点を通る直線からも大きく外れている。この特徴は高野らがクラスタ 2 として示唆した、単純なフィードバックで記述できない注意資源を必要とする機構の特徴と類似している。

最後に集団 3 に関してだが、原点から負側に大きく離れた場所に出現し、Dual 条件では出現しない。このことから、集団 3 の生成には注意資源が必要であると考えられる。

また、高野らの実験手法に加えて^[8]、本研究では新たな方法を 2 つ取り入れた。ひとつは、知覚上の位相誤差を 0 に制御した状態から ΔSE を与えるという手法である。それによって任意の ΔSE を与えることが可能となり、少な

いデータ点数で ΔSE - ΔITI 応答の全体像を観察することが可能となった。また、認知上のタップと音刺激の同期点は被験者に依存するが、この手法を用いることによってその依存性を排除することができ、個体間比較も容易になった。もう一つは、新たな二重課題法の導入である。本研究では、従来の被験者のペースで文章を黙読させる方法ではなく、スクロールさせた文章を黙読させる方法を導入した。これにより、被験者の読書量を調節することが可能となり、より効果的に注意資源を消費させることができた。

5. まとめ

今回、同期タッピング課題における位相誤差を制御し、その応答を観察することで人間のタイミング制御機構の解析を行った。その結果、 ΔSE が比較的小さい場合には、Mates モデル等で記述されている、単純なフィードバック構造をもち、注意資源を必要としない機構が観察された。一方で、 ΔSE が正側に大きくずれた場合は、Mates モデル等で記述されている単純なフィードバックでは記述できない、注意資源を必要とする機構が観察された。また、 ΔSE が負の側でも、単純なフィードバックでは記述できない注意資源を必要とする機構が存在することが示された。今後これらの注意資源を必要とする機構についてより詳しく観察し、それらの機構も考慮に入れた新たなモデルの構築をめざしていきたい。

参考文献

- [1] 渡辺富夫: コミュニケーションにおける身体性, ヒューマンインターフェース学会誌, 1-2, 14/18, (1999)
- [2] 三宅, 辰巳, 杉原: 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, Vol. 40, No.6, pp.670-678 (2004)
- [3] 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)
- [4] 武藤, 三宅, 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, pp.289-294 (2006)
- [5] Y.Miyake, Y.Onishi & E.Poeppel: "Two types of anticipation in synchronization tapping", Acta Neurobiologiae Experimentalis, 64,415/426(2004)
- [6] J.Mates, T.Radil, U.Muller, E.Poppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, Journal of Cognitive Neuroscience, 6-4,332/340(1994)
- [7] Kouji Takano & Yoshihiro Miyake: Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping, Neuroscience Letters, Volume 417, Issue 2, 1 May 2007, Pages 196-200
- [8] Aschersleben G: Temporal Control of Movements in Sensorimotor Synchronization; Brain Cognition; vol.48, 66/79 (2002).
- [9] 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, vol.17, p.839-863(1998)
- [10] K.Dunlap: Reactions on rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; Psychological Review, Vol. 17,399/416