

同期タッピングにおける位相誤差訂正機構の解析

高野 弘二^{*1} 三宅 美博^{*1}

Analysis of Error Correction Mechanism on Synchronization Tapping

Kouji Takano^{*1}, Yoshihiro Miyake^{*1}

Abstract -In this article, we aim to research an ISI (Inter Stimulus-onset Interval)-dependent phase error correction mechanism on synchronization tapping. For that purpose, we examined it by controlling SE (Synchronization error). As a result, it showed that the change of ITI (Inter Tap-onset Interval) negatively correlated to the change of SE. And the gradient was similar between ISI=450 and ISI=1800, suggesting that phase error correction mechanism does not depend on ISI.

Keywords: Synchronization tapping, Timing mechanism, Phase error correction, Sensorimotor synchronization

1. はじめに

近年、通信技術の発達等に伴い、コミュニケーションの場面に人工物が介在する事象が増加している。それにより人間-機械系を人間-人間系に近づけようという研究も行われている。我々のグループでは、目標となる人間-人間系において時間的な“間”を介する相互作用が重要であるという観点から、歩行介助や音楽コミュニケーションを解析し、それを人間-機械系として再構築を行ってきた^[1,2]。その一方で、時間的な“間”がどのように認知されタイミング制御に用いられているかを調べるために人間の時間認知機構についての研究も同期タッピング課題を用いて行ってきた^[3,4]。

1.1 同期タッピング課題について

同期タッピング課題とは、周期的に提示される刺激に対して被験者がボタン押しなどのタップを同期させる課題で、人間のタイミング制御機構の研究に多く用いられている^[5]。同期タッピング課題でのタイミング制御に必要な要素として、タップと提示刺激の周期誤差訂正と位相誤差訂正があるとされている。これは周期と位相の両方が合わなければ安定した同期は実現しないためである。

これらに対応して同期タッピング課題では、制御可能なパラメータとして刺激の提示周期と、タップと刺激提示の時間差である位相誤差があるが、そのうち、刺激提示周期を制御する実験は多い。

Thaut らは刺激提示周期を一定の周期と振幅を持って、変動させる実験を行い^[6]、刺激提示周期の変動に対してタップと提示刺激の時間差と、タップの周期が適応することを示した。Repp は周期的ではない形で刺激提示周期

を制御する実験を行い^[7]、その結果、刺激提示周期の変動幅について、その周期変動が認知された場合と認知されない場合の被験者の応答が違うことを報告している。

これら周期を制御する実験系において、周期誤差訂正のみではなく、位相誤差訂正の機構についても研究がなされてきた。しかし、位相誤差の制御に関しては位相誤差を 0 にした場合の被験者の応答を観察する研究が行われたのみである^[8]。

そこで我々のグループはタイミング制御機構の研究におけるもう一つのアプローチとして、位相誤差を制御する実験を行い、刺激提示周期により異なる位相誤差訂正機構について調べてきた^[9]。しかし、この実験系は、いくつかの改善すべき問題を含んでおり、そのために被験者の応答に関して原因が特定できない結果が存在した。そこで、今回の報告ではこの問題点を改善した実験系を用い、以前の研究により得られた結果をより明確化することを目的とする。

1.2 問題点および方針

我々の以前の研究^[9]では、刺激提示周期に依存した被験者の位相誤差訂正の違いを観察するために、はじめに一定周期で刺激を提示し、その後、位相誤差を固定する方法を用いた。その結果、はじめに提示した刺激周期に依存する位相誤差訂正機構の違いが観察された。

しかし、その研究では刺激提示周期に依存した被験者の位相誤差訂正機構の違いを明らかにすることを目的としていたにもかかわらず、試行途中で刺激提示周期が大きく変動してしまい、被験者の応答が位相誤差に対するものか、周期変化に対するものかということについて正確な切り分けが難しくなっていた。また、実験の構造上、結果の解析が複数回の応答の平均値をデータとして用いる事となり、結果を最終的な時系列モデルに反映させるには問題があった。

これらの問題を改善するために、今回の実験系で二つ

*1: 東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻

*1: Tokyo Institute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Department of Computational Intelligence and Systems Science,

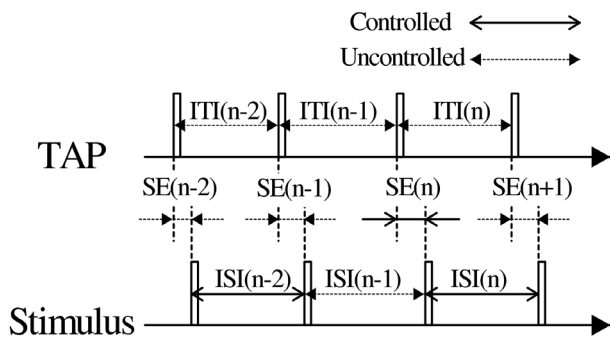


図1 実験課題およびパラメータ

Fig.1 Experimental task and parameters of synchronization tapping

の条件が必要になる。一つ目は以前の研究で用いた実験系が含んでいた、周期の大幅な変動という問題を解決していること。二つ目は平均値ではなく、1タップ毎のデータを解析に用いることができるということである。

この条件を満たすために以前のように連続して位相誤差を固定するのではなく、刺激周期が固定されている連続したタップのうち、1回のみ位相誤差を固定するという方法を用いる。これにより、位相誤差固定の際の周期は変化するものの、その幅は小さく、またすぐに訂正されるため、周期依存性を損ねることのない結果が得られると期待される。また、位相誤差を制御した回の変動とその前後の挙動を観察することで、以前の実験とは違い平均化されていないデータを解析することができる。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

ここで同期タッピング課題における3種類のパラメータについて定義する。一つ目は刺激の提示周期であるISI(Inter Stimulus-onset Interval)、二つ目は被験者のタップ周期であるITI(Inter Tap-onset Interval)、三つ目はタップ時刻から刺激提示時刻を引いた差であるSE(Synchronization Error)である。どのパラメータも単位はミリ秒[ms]である。

2.2 目的および手法

今回の実験の目的は以前の研究⁹⁾で使用した実験系において生じた、1試行中の刺激提示周期(ISI)の変動による影響という問題を極力排除した系を構築し、それによりISIの長短により生じた位相誤差訂正機構の違いがどこに存在するのかを明らかにすることである。

そのためには条件としてISIの維持とSEの固定という矛盾した条件を満たす必要がある。そこで今回はまず、ISIを固定した通常通りの同期タッピング課題を行い(図1, ISI(n-2),(n),controlled)、その途中で1回、SEを固定する(図1, SE(n),controlled)という方法を用いる。これにより、SE固定の際のISIは変化するものの、その幅は小さく、またすぐに訂正されるため、ITIの応答におけるISI依存

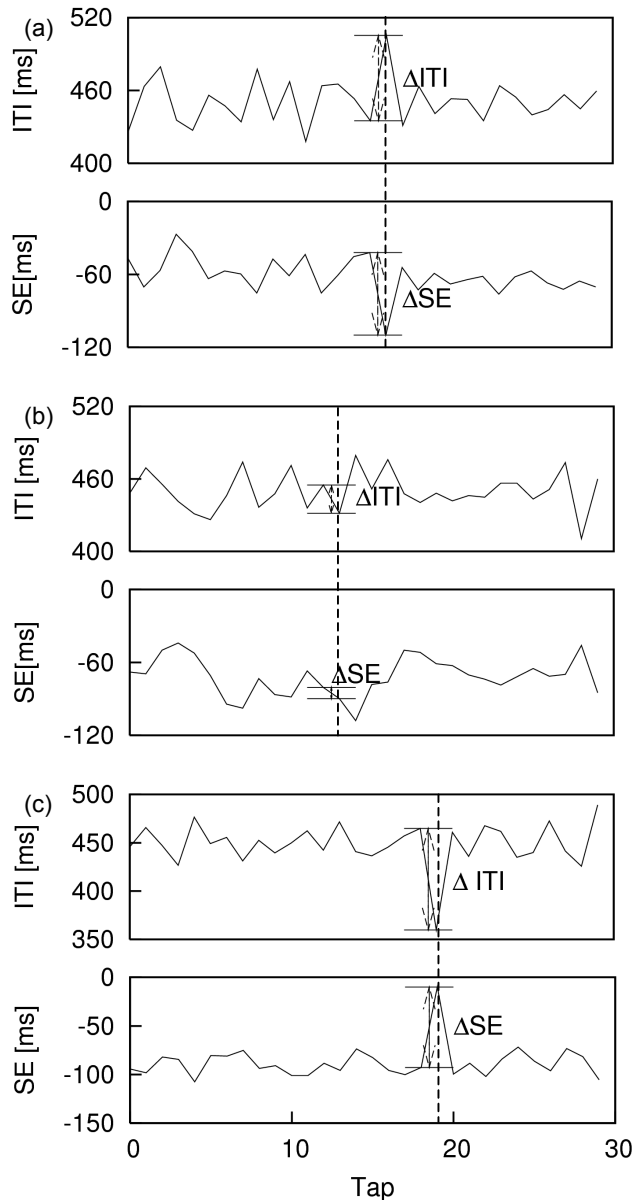


図2 SEとITIの時間発展の例

Fig.2 Examples of temporal development of SE and ITI

性を損ねることのない結果が得られると期待される。また、主な観察対象としてはこちらから提示したSEに対する被験者の応答であるITIを用いる。

2.3 被験者および課題

健常な右利きの男子大学院生4名に無償でご協力頂いた。被験者に与えられた課題は、提示される刺激音の開始時刻と自身のタップを同期させることである。被験者は静かな部屋で椅子に座り、瞑目状態で右手人差し指を用いてタップをするように指示された。また、右手人差し指以外を使用してリズムを取ること、一回の周期を分割してカウントすることが禁止事項として提示された。被験者には提示周期が変化することは伝えられており、変化する周期に対応してタップを行うよう指示をした。

2.4 システムについて

システムはPC(IBM, Thinkpad570)上のシングルタスク

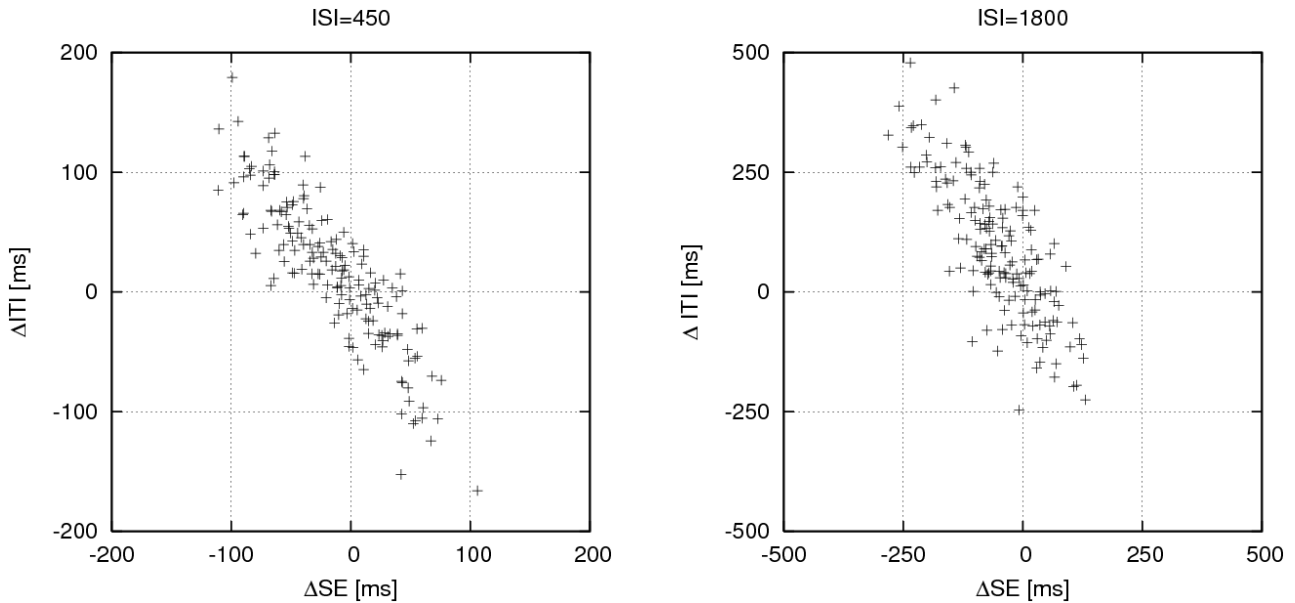


図3 ΔSE とΔITI の関係

Fig.3 Relationship between ΔSE and ΔITI

OS に C 言語を用いて実装された。刺激音(500Hz、100ms) はヘッドホン(Victor, HP-D110)を使用して被験者に提示された。被験者のタップはストロークが 1mm 以下のボタンをパラレルポートを通じて PC に接続し計測された。システムの時間分解能は PC 上の RTC(RealTimeChip)を用いて 1/2048s として設定された。

2.5 手順

図 1 は実験課題の詳細を示した図である。Controlled はこちらから制御したパラメータであり、Uncontrolled は被験者の応答により生じるパラメータである。

被験者は基本的には一定周期の刺激音を提示され(図 1 の ISI 上の Controlled)、それに合わせるようにタップを行う。そこで、タップと提示刺激の時間差に対する応答を観察するために、20 タップ内に 1 回(正確には 16 タップから 20 タップの間に 1 回。位置はランダム)の周期で被験者のタップ後一定時間をおいて刺激音を提示する(図 2 の SE(n))。これにより、タップと提示刺激の時間差である SE を制御した。

制御された刺激提示周期(ISI)は 450,1800ms の 2 種類、タップ後刺激音を提示するまでの時間(SE)は 0, 10, 30, 50, 70, 90, 110 の 7 種類で、1 試行は 145 回のタップにより構成され、1 試行中に上記の SE を全て用いた。1 つの ISI につき 6 回の試行を行い、被験者 1 人あたり合計で 12 試行を行った。

3. 結果

3.1 SE およびITIの時間発展

図 2 に ISI=450 における SE の時間発展の例を示す。図中、垂直点線の部分で SE が固定されている。ITI は、固定した SE がその周辺の SE と比べ大きく変化した部分で

表 1 ΔSE とΔITI の関係に関する指標

Table 1 Indices of relationship between ΔSE and ΔITI

Index	ISI=450	ISI=1800
Correlation coefficient	-0.87	-0.79
Gradient	-1.17	-1.27
R ²	0.76	0.62

顕著に変化した(図 2)。制御した SE が周辺の SE に比べて顕著に大きくなった場合(図 2a)は ITI が増加し、あまり変わらない場合(図 2b)は ITI が顕著な変化を見せず、小さくなった場合(図 2c)は ITI が減少した。この傾向は提示した刺激周期に関係なく観察された。

これらの挙動についてタップと提示刺激の関係において SE が大きくなった場合は、被験者の認知上では SE が大きくなったこととなり、それを修正するために、タップを遅らせた結果 ITI が大きくなったと推測される。b、c についても同様と推測される。つまり、ITI の変化は被験者の時間変化の認知を示していると推測される。このことから以降はこの SE の制御を行った部分を中心に 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。

3.2 SE 固定部周辺のITIの挙動

図 3 はΔSE 横軸に、ΔITI を縦軸に取り全被験者のデータを提示 ISI 毎にプロットしたものである。ISI=450,1800 が共にほぼ原点を通る直線上にあり、また、その構造も非常に連続的である。先行研究において^[10]、イベントの前後関係や、変化の認知可能な時間長は 30ms 以上であることが言われており、今回の結果はそれよりも小さい時間変化が知覚可能であることを示唆する結果となっている。また、ΔSE に対するΔITI の応答として、その傾きは

ISI=450において-1.17, ISI=1800において1.27となっている。また、 R^2 値は0.76 (ISI=450)、0.62 (ISI=1800)、相関係数は-0.87 (ISI=450)、-0.79 (ISI=1800)となっており(表 1)、 ΔSE に対して ΔITI が非常に強い負の相関を持っていることが示される。また、その関係がISIの長短による顕著な差を持たないことが推測される。

4. 考察

ΔSE と ΔITI の関係について、今回の結果においてはISIの長短による特性の差は観察されなかった。このことは、1.2節で記述した、我々の以前の研究^[9]で観察されたISIの長短によりSEに対する被験者の応答であるITIが変化するという結果とは対応しない。このような結果の違いが現れた原因としては、実験条件の違いが考えられる。その最も大きな違いは、試行中の刺激提示周期変化量の減少であり、これにより、観察対象となる機構を位相誤差訂正機構に絞り込むことができたものと思われる。

この位相誤差訂正機構については、 ΔSE と ΔITI が強い負の相関を持つという特性から、我々の以前の研究で示された二つの訂正機構のうち、短い刺激提示周期で観察された機構と同じものと推測される。また、その機構は注意資源^[11]を必要としないことが示されているため、今回観察された機構は、注意資源を必要としないと推定される。であるとすれば、以前の研究で示した、ISIの長短による被験者の応答の差は、もう一つの誤差訂正である周期誤差訂正に起因していると推測される。また、その周期訂正機構そのものか、関連した構造が注意資源を必要とするものと推測できる。

また、先行研究で報告されているよりも、 ΔSE に対する ΔITI の応答が連続的であり、その変化の閾値が小さかった。これは位相誤差訂正機構が注意資源を必要としないと推測されることと併せて、機械的な応答機構を持ち、自動的な応答を行っているとして唆される。

次に ΔSE と ΔITI の応答量の問題について、今回はその傾きを示す係数が1.2程度であった。 ΔSE と ΔITI が直線的な応答特性を持つこと自体はすでに知られているが^[7]その係数は0.6程度といわれている。このことについてReppの先行研究^[7]で観察された、被験者の ΔSE に対する挙動が実際の時間差よりも大きくなるという結果から、今回の結果が妥当であると推測される。

5. まとめ

今回、同期タッピング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機構の解析を行った。その結果、位相誤差訂正は刺激を提示する周期には依存して変化しないこと、また、その訂正が実際の位相誤差よりも大きく行われることを示した。今後、今回は唆に留まった周期訂正機構と刺激提示周期の関連性、および注意資源の関係についても、二重課題法^[12]等

を用いて、その関連を調べていきたい。

今回の結果を応用すれば周期的な時間構造を持つアプリケーションにおいて、時間差を提示する際、より使用者が使いやすいインターフェースを構築することができると考えられる

6. 参考文献

- [1] 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, pp.873-875 (2004)
- [2] 小林洋平, 三宅美博: 階層化された相互引き込みモデルに基づくアンサンブルシステム; 計測自動制御学会論文集 (in press)
- [3] Miyake, Y., Onishi, Y., & Poppel, E.: Two types of anticipation in synchronization tapping; *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, vol.64,no.3, pp.415-26 (2004)
- [4] 小松知章, 三宅美博: 同期タッピング課題における非同期量の時間発展; 計測自動制御学会論文集 vol.41,no.6, pp.518-526 (2005)
- [5] Aschersleben G.: Temporal Control of Movements in Sensorimotor Synchronization; *Brain Cognition*; vol.48, pp.66-79 (2002)
- [6] 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, pp.839-863 (1998)
- [7] Repp B.H.: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization; *Human Movement Science*, vol.20, pp.277-312 (2001)
- [8] Fraisse P., & Voillaume C.: Les repères du sujet dans la synchronisation et dans la pseudo-synchronisation.; *L'Année Psychologique*, vol.71, pp359-369 (1971)
- [9] Takano K. & Miyake Y.: Two types dynamics in negative asynchrony of synchronization tapping; *Proc. of SICE Annual Conference 2004 (SICE2004)*, Sapporo, Japan, pp.1792-1796 (2004)
- [10] Mates, J.: A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: II . Stability analysis, error estimation and simulations; *Biological Cybernetics*, vol.70, pp.475-484 (1994)
- [11] Kahneman, D.: *Attention and Effort*; Englewood Cliffs, N.J. (Eds), Prentice Hall, (1973)
- [12] Baddeley, A.: *Working Memory*; Oxford University Press, pp.304 (1986)