

# 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

東京工業大学 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 ○野島 満春、下茂 博章、三宅 美博

## Analysis of Dual Timing Control Mechanism in Synchronization Tapping

○Mitsuharu NOJIMA, Hiroaki SHIMO, Yoshihiro, MIYAKE

Graduate School of Science and Engineering, Department of Computational Intelligence and System Science

**Abstract** – The purpose of this paper is to clarify internal phase correction mechanisms affecting timing control in a synchronization tapping task. Synchronization error (*SE*) was directly controlled in 900 ms of the inter stimulus onset interval (*ISI*) using our experimental method. As a result, two types of internal phase correction mechanism were revealed. 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

人間は変化する環境に適応しつつ生活している。その時間の側面に深く関与しているのがタイミング合わせの能力である。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な様に、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上でも重要な役割を担っているものとして注目されている<sup>[1,2]</sup>。

そのタイミング機構に関する先行研究の多くは同期タッピング課題を用いて行われる。同期タッピング課題とは音ないし光で与えられる周期的パルスに対してタップを同期させるという心理学的実験課題である。この同期タッピング課題のメカニズムに関する研究からは多くのタイミング制御のモデルが提案されている。現在提案されているモデルの基盤となっているのが Mates モデルというものである<sup>[3]</sup>。このモデルは単純な負のフィードバックによる位相誤差修正機構と周期誤差修正機構とが結合される形で構成される。また、神経基盤に関する研究は、人間が注意資源を必要としない身体的機構と注意資源を必要とする認知的機構の二重化されたタイミング機構を用いていることを示唆してきた<sup>[4,5]</sup>。

しかし、上記のタイミング制御モデルの実験的検証はほとんど行われておらず、そのメカニズムと注意資源の関係も明らかにされていない。そこで本研究では位相誤差を直接的に制御できる新たな実験系を開発することで Mates モデルを検証し、さらに二重課題法を採用することで注意資源からの影響も評価する。

### 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 Fig.1 のように定義する。これは以下の式(1)~(3)のように書かれる。

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

$$ITI(n) = R(n+1) - R(n) \quad (2)$$

$$SE(n) = R(n) - S(n) \quad (3)$$

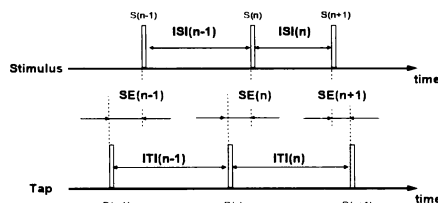


Fig. 1 Timing-chart of temporal relationship between taps and auditory stimulus

#### 2.2 Mates モデル

Mates モデルは内的に知覚されるパラメータにより記述されており、下記のように表される。

$$T_i(n) = T_i(n-1) - \beta \cdot [T_i(n-1) - \{S_i(n) - S_i(n-1)\}] \quad (4)$$

$$R_i(n+1) = R_i(n) + T_i(n) - \alpha \cdot e_i(n) \quad (5)$$

ここで  $\alpha, \beta$  は係数であり、 $S_i$  は音刺激を知覚した時刻、 $R_i$  は Tap 動作の運動指令が開始された時刻になっている。また、 $T_i$  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、 $e_i$  は知覚上の Tap 時刻と音刺激時刻の位相誤差である。ここでタイムキーパーの変動  $\Delta T_i$  と位相誤差の変動  $\Delta e_i$  を以下のように定義すると、

$$\Delta T_i(n) = T_i(n+1) - T_i(n) \quad (6)$$

$$\Delta e_i(n) = e_i(n+1) - e_i(n) \quad (7)$$

(4)式と(5)式の Mates モデルは次の 1 つの式で表現される。

$$\Delta T_i(n) = -\beta \cdot \Delta e_i(n) - \alpha \cdot \beta \cdot e_i(n) \quad (8)$$

つまり、Mates モデルは知覚上の位相誤差と、その変動からのフィードバックによって、タイムキーパーの変動を決定しているモデルである。

ただし Mates モデルは内的に知覚される量の関係を表すものであり、そのままでは、外的に検証することが不可能である。そこで、Mates モデルに関して、外部から計測可能な量と対応させるため、以下のように  $e_i$  を定義する。*SE* の平均値を主観的に同期していると感じている点からのずれの大きさと考える。つまり、*SE* の平均値からのずれが知覚上の位相誤差  $e_i$  に対応すると考える。

$$e_i(n) = SE(n) - \text{mean}SE \quad (9)$$

また、定義上  $T_i$  が *ITI* と一致することを考慮し、さらに *ITI* の変動を知覚上の位相誤差を 0 に制御した状態における  $ITI(m)$  と  $\Delta SE$  を与えた状態における  $ITI(k)$  ( $k > m+1$ ) の差とみなし下記のように  $\Delta ITI_e$  として定義する。

$$\Delta ITI_e = (ITI(m) \text{ in the } e_i = 0 \text{ condition}) - (ITI(k) \text{ in the } e_i = \Delta SE \text{ condition}) \quad (10)$$

以上の条件を考慮することで、Mates モデルは以下のように書き換えることができる。

$$\Delta ITI_e = -const \cdot \Delta SE \quad (11)$$

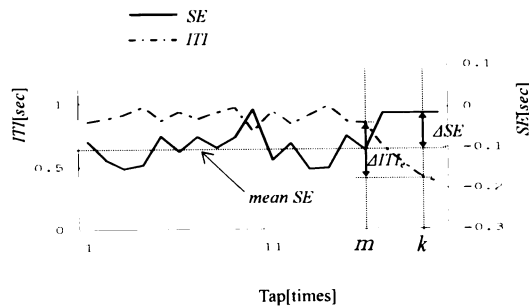


Fig.2 Temporal development of SE and ITI

よって、本研究では内的であるため観測不可能とされてきた Mates モデルを本研究では外的に制御可能なパラメータ  $\Delta SE$  と観測可能なパラメータ  $\Delta ITI_e$  により記述することを可能とした。さらに、 $\Delta SE$  と  $\Delta ITI_e$  の線形な関係として記述できることがわかった。

### 2.3 実験概要

本研究の第1の目的は、Mates モデルのタイミング機構の実験的検証である。そのために上記の式(11)が成立するか否かを明らかにする。そこで同期タッピング課題を2つの段階に分ける。第一段階では音刺激の提示周期を固定し通常の同期タッピングを行う。ここで、被験者が主観的に同期していると感じている時刻と物理的に同期している時刻のずれの大きさ、つまり SE の平均値を算出する。

第二段階では、まず  $m$  タップ目では第一段階で得られた SE の平均値で SE を制御し、その時の  $ITI(m)$  を計測する。さらに、 $m+1$  タップ目以降、タップと音刺激が同期していると知覚している状態から位相誤差の変動  $\Delta SE$  を与え、その時の  $ITI(k)$  を計測する。それによって、 $\Delta SE$  の応答である  $\Delta ITI_e$  を算出でき、Mates モデルの妥当性を検証した。ここでは、例として、 $\Delta SE$  を正の値に制御した場合の SE の時間発展をグラフ Fig.2 に示した。

課題を遂行する被験者は、ボランティアとして健康な男子3名(23-25歳)に依頼した。

また、第2の目的である注意資源からタイミング機構への影響を評価するために二重課題法を採用する。具体的には、上記の同期タッピング課題のみを行う single 条件と、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い、比較する。

### 3. 結果

実験によって得られた SE と ITI の時間発展の一例を Fig.2 に示す。ここでは、 $\Delta SE$  が正の状況のグラフを取り上げた。制御量としての  $\Delta SE$  が正の状況では ITI は減少していき、 $\Delta ITI_e$  は負となることがわかる。 $\Delta SE$  が 0 の状況では ITI の変化は観察されず、 $\Delta ITI_e$  は 0 近傍となった。また、 $\Delta SE$  が負の状況では ITI は増加し、 $\Delta ITI_e$  は正となった。

Fig.3 は横軸に制御した  $\Delta SE$ 、縦軸にその応答の  $\Delta ITI_e$  をとったものである。原点近傍に直線状にプロットが分布し single 条件と dual 条件の差があまりないクラスタ 1、 $\Delta SE > 0$  側において原点を通る直線から大きく外れた位置に分布し single 条件では存在するが dual 条件では存在しないクラスタ 2、 $\Delta SE < 0$  側において原点を通る直線から離れた位置に存在し single 条件では存在するが dual 条件では存在しないクラスタ 3 の3つのクラスタが観測された。

### 4. 考察

タイミング機構が Mates モデルに従う場合は、 $\Delta ITI_e$  と  $\Delta SE$  には線形な関係が予想され、Fig.3 のプロットは原点を通る直線上に分布するはずである。

しかし、Fig.3a の single 条件を見ると、原点を通る直線上にプロットが存在するクラスタ 1 の他に、クラスタ 1 の帰帰

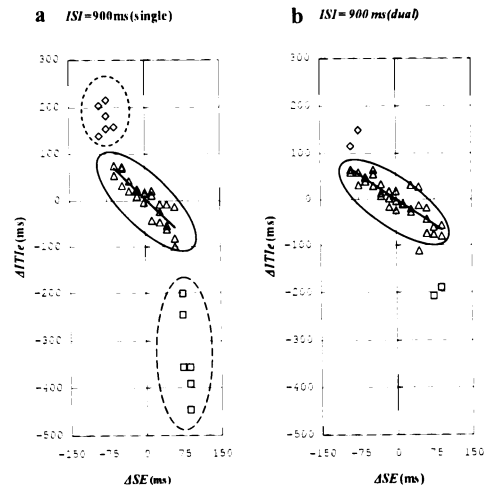


Fig.3 Relationship between  $\Delta SE$  and  $\Delta ITI_e$  under single task condition and dual task condition

直線から外れるクラスタ 2、クラスタ 3 が存在することが分かる。このことからクラスタ 1 は Mates モデルによく整合し、クラスタ 2、クラスタ 3 は Mates モデルから逸脱することが示唆された。

さらに、Fig.3b の dual 条件に関して、クラスタ 1 は存在するが、クラスタ 2、クラスタ 3 に関しては single 条件よりも抑制されていることが分かる。

Mates モデルによく整合するクラスタ 1 は、single 条件 dual 条件共に出現し、注意資源からの影響を受けにくいことから、身体的機構を中心に構成されていることが予想される。またクラスタ 2、クラスタ 3 は主に single 条件で観測され、dual 条件で抑制あるいは消滅する。このことから注意資源を必要とする認知的機構の関与が示唆される。

以上の結果は人間が身体的機構と認知的機構の2種類の機構を用い、動的で複雑な環境への適応を実現していることを示している。特にこの後者の知見は Mates モデルでは扱われておらず、今後、その知見も組み込んだ新たなモデルを構築していく必要がある。

### 参考文献

- [1] Condon, W.S., Sander, L.W., "Neonate is synchronized adult speech", Science, Vol.183, pp.99-101 (1974)
- [2] Webb, J.T., "Interview synchrony: An investigation of two speech rate measures in an automated standardized interview" In Pope, B., Siegman, A.W. (Eds.), Studies in dyadic communication, Pergamon, pp.115-133 (1972)
- [3] Mates, J., "A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence: I. Timing and error corrections", Biological Cybernetics, vol.70, pp.463-473 (1994a).
- [4] Miyake, Y., Onishi, Y., Poeppel, E., "Two types of anticipation in synchronization tapping", Acta Neurobiologiae Experimentalis. Vol.64, pp.415-426 (2004)
- [5] Takano, K., Miyake, Y., "Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping", Neuroscience Letters, Vol.417, pp.196-200 (2007)