

同期タッピングにおける二重化された同調ダイナミクス

東京工業大学大学院 総合理工学研究科 ○中島 壮人, 小松 知章, 三宅 美博

Dualized Timing Dynamics in Synchronization Tapping

○Masato NAKAJIMA, Tomoaki KOMATSU and Yoshihiro MIYAKE

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Abstract: A predictive behavior called "negative asynchrony" is well known in the sensory-motor coupling. This phenomenon means motion timings precede the cyclic onset of stimuli. time-series analysis was applied to clarify it in frequency response. As a consequence, it was shown that anticipatory behavior in the tapping task had two different characters corresponding to two types of anticipatory timing control.

1. はじめに

インターフェイスを「外部イベントと内部イベントとの界面」と捉えた場合、人間におけるインターフェイスでは興味深い挙動が観察されている。視聴覚などの外的イベントからの情報入力と、それに基づく内的イベントすなわち応答出力とを結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「負の非同期(Negative Asynchrony)現象」と呼ばれるものである^[1-3]。

人間が運動にもなう時間遅れを考慮すれば、時間発展する外の出来事に対してミリ秒レベルで同期をとる予測性が不可欠であり^{[4][5]}、そうした脳内の高度なタイミング制御機構の一端をあらわすものが Negative Asynchrony という現象ではないかとして注目されている。またこれは、人間の協調プロセスを共創的に支援しうる人工物^[6]を目指すわれわれの研究グループにとっても、興味深いものである。

われわれの研究グループでは、これまで同期タッピング課題を用いてタイミング制御機構の解析を進めており、人間には 2 種類のタイミング機構が存在することを明らかにしてきた^[7]。しかしながら、それらの研究は Negative Asynchrony の解析に際して時系列性の限られた統計手法が適用されてきた。そのため時系列データとしての定量的・客観的評価が困難であるという問題点が積み残されており、ひいては同現象のダイナミクスとしての側面を十分に明らかにしては来なかったのである。

そこで本研究では、これを時系列データとして捉え、スペクトル解析によって分析・検討する。それに基づき、Negative Asynchrony 生起における予測的なタイミング制御機構を明らかにするものである。

2. 実験方法

2.1 実験課題

被験者に周期的な音パルスで聴覚刺激(以下 BEAT)を供給しその応答としての指運動(以下 TAP)を電氣的に検知する。被験者には、BEAT に可能な限りタイミングを合わせて TAP する、という同期タッピング課題が与えられている。

実験条件としての可変項は、BEAT 周期を示す ISI (Inter Stimulus-onset Interval) である (Fig. 1)。ISI の設定は 450 ~ 1800ms の範囲で $ISI = \{450, 600, 900, 1200, 1500, 1800\}$ の 6 通りを試行 1 セットとした。

測定する特徴量は SE (Synchronization Error) である。これは BEAT タイミングに対する TAP タイミングの時間差について遅れ方向を正としたものである (Fig. 1)。

2.2 被験者

課題を遂行する被験者は、ボランティアの大学院生 (20 代男女) 4 人に依頼した。被験者はいずれもリズムパルスを聴き取るにあたって障害を覚え、かつ右利きで、応答の Tap 動作は利き手人差し指にて行なった。

また被験者は瞑目し、手足など身体の一部を動かしてリズムをとることを禁止されている。

2.3 実験システム

実際の BEAT 生成は、PC 内蔵のタイマーチップにより供給されるリアルタイムクロックと シングルタスク OS (IBM PC-DOS2000) 上の C プログラムにより、精度 1/1024 で行った。TAP の記録も同精度で、パラレルポート経由の同 PC に行なわせている。

聴覚刺激は、500Hz のものを各 100ms 間はずつ持続させた。このリズムパルスはモノラルであり、カップ型ヘッドフォンを介して被験者の両耳へと等しく与えている。1 回の試行は 300 BEAT から成り立っており、そのうち最初の 44 BEAT を除いた 256 BEAT を実計測値として採用した。

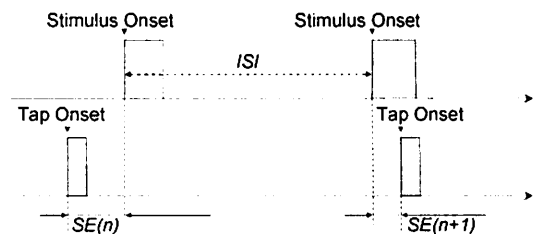


Fig.1 Timing-Chart of temporal relationship between tapping and auditory stimuli

3. 実験結果

3.1 統計解析

実験において得られた SE の時間発展の例を Fig. 2a,d に示す。SE の時間発展では ISI が増加するに従い SE のゆらぎの幅が大きくなっていることが見て取れる。

また、ヒストグラムでは短 ISI 領域で -50ms 近辺にピークが見られ、Negative Asynchrony が確認できる。しかし、ISI 増加に伴いそのピークは失われ、SE=0 を挟んで正負双方へ分布が拡がっている (Fig. 2b,e)。

これは既知の同期タッピングの結果とよく一致しており、今回の実験系が正しく構築されていることを示している。

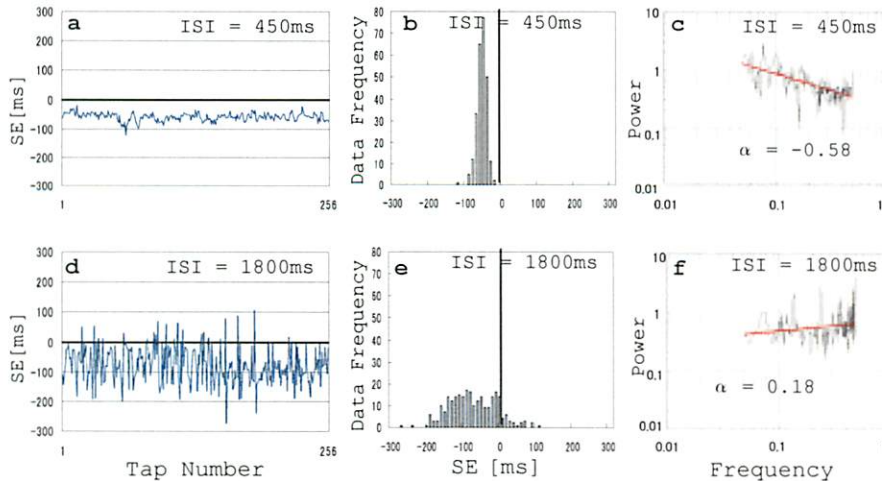


Fig.2 Temporal Development, Histogram and Power Spectrum of SE

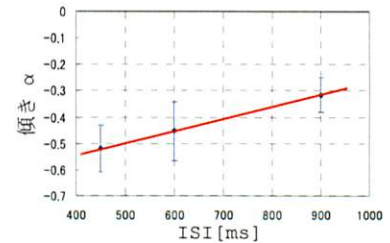


Fig.3 Gradient of power spectrum

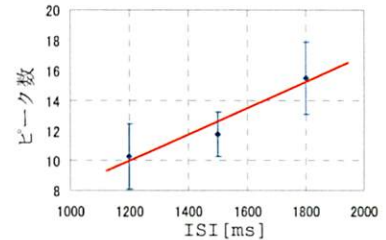


Fig.4 Mean of "significant peak"

3.2 スペクトル解析

ISI=450ms のパワースペクトルでは低周波側のパワーが強く現われている(Fig.2c)。ISI=450, 600,900ms では両対数プロット上で直線分布とみなすことができ($p < 0.01$)周波数に対するパワーが反比例の関係を示していることがわかる。

一方 ISI=1200,1500,1800ms のパワースペクトルでは反比例関係を示さず($p > 0.01$)、突出したピークが顕著に現われている(Fig.2f)。これは、SE が特定周波数に強く依存していることを示している。

3.2.1 スペクトルの傾き

周波数とパワーが反比例の関係にあるということは SE の時系列変動が特定周波数に非依存であり、かつ試行時間長が許す限りにおいて、より低い周波数ほど変動パターンへの寄与が大きいという自己相似性を持つとも言える。

このようなスペクトルの指標を定めるために、スペクトルの両対数プロットにおいて、縦軸を Log にとって最小二乗法で直線近似を行った結果 $y = \alpha x + \beta$ から「傾き α 」を定義する。各 ISI に対して全試行の α 平均を求めたところ、Fig.3 のように ISI の増加にともなって傾きが緩和され、パワースペクトルがホワイトノイズ化する傾向が見られた。また、Log(ISI)をとった場合、傾き α の変化はほぼ直線状に分布することが見て取れた。

3.2.2 ピーク数

一方、特定周波数に強くピークの現われるスペクトルについては顕著なピークが 1 本以上現れ、それ以外の周波数領域はホワイトノイズを呈していた。つまり、スペクトルが固有周期型の特性を持っていると言える。

このようなスペクトルの指標を求める。パワースペクトル上の顕著なパワーの周波数成分が存在することの指標として Power(f)の「ピーク数」に注目する。具体的には、以下の式(1)に従って Power(f)が平均値+標準偏差を超えた場合に有意ピークとし、その数をカウントする。

各 ISI に対して全試行の有意ピーク数の平均を求めたところ、Fig.4 のように ISI の増加にともなってピーク数が増加していることがわかった。

$$\begin{aligned}
 Peak(f) &= 1 \quad (Power(f) \geq Power_{ave} + Power_{std}) \\
 Peak(f) &= 0 \quad (Power(f) < Power_{ave} + Power_{std}) \quad (1) \\
 Peak &= \sum_{f=0.05}^{0.5} Peak(f)
 \end{aligned}$$

4. 考察

自己相似性の強いスペクトルパターンは短ISI側に顕著に表れ、ISI増加に伴い失われていった。一方、有意ピークの本数はISI増加に伴って増加していった。

今回得られた解析結果からは「ISIに依存する2種類の動的特性」が存在する可能性が示唆される。またこの結果は我々のグループの先行研究における、短ISI領域と長ISI領域ではタイミング制御機構が異なる^[7]という知見と関連付けられることが予想される。

本研究では同期タッピング課題のデータ処理において、非同期量の変動に含まれる周波数成分に注目することの有用性を提示しその結果として2つの異なる動的特性が予測的なタイミング制御過程に含まれることを明らかにした。

しかしながら、二重課題法を用いた先行研究^[7]において1800ms を境にタイミング制御機構の変化が確認されており、今回得られた2つの動的特性との関連を調べていく必要がある。よって今後は、1800ms 以上の長周期の ISI 領域において時系列解析をするとともに、今回得られた2種類の動的特性が二重課題法によってどのような影響を受けるかを調べていきたい。

参考文献

- [1] L.T.Stevens: On the time sense, *Mind*, 11, 393/404 (1886)
- [2] P.Fraiss: The sensorimotor synchronization of rhythms, In J.Requin(Ed.), *Anticipation et comportement*, Centre National, Paris, 233/257(1996)
- [3] G.Ashersleben and W.Prinz: Synchronizing actions with events: The role of sensory information, *Perception & Psychophysics*, 57-3, 305/317(1995)
- [4] D.N.Lee, D.S.Young, P.E.S.Reddish, T.H.Lough and T.M.H.Clayton: Visual timing in hitting an acceleration ball, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35, 333/346 (1983)
- [5] 三嶋博之: エコロジカル・マインド知性と環境をつなぐ心理学, NHK ブックス(2000)
- [6] Miyake, Y., "Co-creation system and human-computer interaction," In T Sakai, K Tanaka, K Rose, H Kita, T Jozen, H Takada (Eds.), 3-rd Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing (C5 2005), pp.169-172, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos (2005)
- [7] Y.Miyake, Y.Onishi & E.Poeppl, E: "Two types of anticipation in synchronous tapping," *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 415/426 (2004)