

同期タッピングにおける予測的タイミング機構の時系列解析

中島 壮人^{*1} 小松 知章^{*2} 三宅 美博^{*1}

Time-Series Analysis of Anticipatory Timing Control in Synchronization Tapping

Masato Nakajima^{*1}, Tomoaki Komatsu^{*2} and Yoshihiro Miyake^{*1}

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, and it is commonly observed in the synchronization tapping task. With the use of dual-task method, Miyake et al. had already analyzed this phenomenon and reported two types of anticipatory timing control. However, in such previous researches the tapping task has been investigated by statistical analysis of synchronization errors (SE). In this report we assume that the asynchronous displacement has temporal structure. And 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.

Keywords: synchronization tapping, negative asynchrony, time-series analysis

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・体性感覚などの外的イベントからの情報入力と、それにもと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」である^[1-3]。

これは感覚刺激・知覚の成立・身体運動・入力トリガーとなる処理・それに従う出力という、単方向かつ受動的な情報流れでは記述が困難と考えられるものであり、インターフェイス内部側における”主観としての時間流れ”の成立を示唆しうる。また運動にともなう時間遅れを考慮すれば時間発展する外的イベント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る^{[4][5]}。このように人間におけるインターフェイスは、高度な内外イベントのタイミング合わせ・主観時間と実時間との同期によって、不可避の時間遅れに対する予測的挙動を実現していると考えられる。そうした脳内の時間知覚・処理機構の有する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を始めとする現象ではないかと注目されている。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^[6-10]を目指すわれわれの研究グループにとって、ユーザ・人工物間で各々の内部時間を同期させうるインターフェイスの雛型として興味深

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、特に注意資源を考慮することによって、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^[11]。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。

そこで本論文では、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と記す)を供給しその応答としての指運動(以下TAPと記す)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)。

*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

*2: 国立リハビリテーションセンター研究所

*2: Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

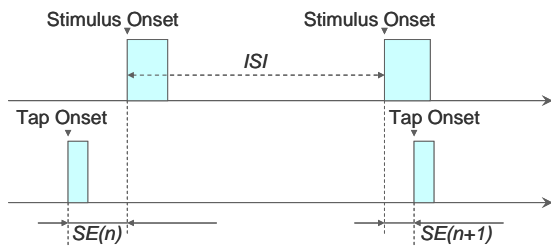


図1 同期タッピングのタイミングチャート

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

2.2 被験者

課題を遂行する被験者は、ボランテイアの大学院生(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動作は利き手人指し指にて行なった。なお4人は過去の同様なタッピング実験系動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。

また被験者はあらかじめ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。求めた時間分解能が得られていることは確認を行なった。

聴覚刺激は、500Hzのものを各100ms間ずつ持続させた。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。音量は、主観的に聴き取りやすい範囲で一定に設定した。1回の試行は300BEATから成り立っており、そのうち最初の44BEATを除いた256BEATを実計測値として採用した。刺激を阻害する可能性のある要因、すなわちBEATと異なる周期をもった雑音源は知覚されないよう排除した環境を用意する。これら諸条件はいずれの被験者に対しても共通のものとした。

3. 実験結果

3.1 統計解析

実験において得られたSEの時間発展及びヒストグラムの例をFig.2とFig.3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広がっている。これらは既知

の同期タッピング実験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。

3.2 スペクトル解析

これまでは、時系列性を保持しない上記のような統計解析が適用されてきた。しかし本研究では以下の手順に従ってスペクトル解析を行うものとする。

SEデータ列を平均0、分散1に正規化し、そこから自己相関係数を導出する。

$$c(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-k-1} x(t+k)x(t) \quad (1)$$

以上で導出された自己相関係数C(k)に対し、離散フーリエ変換(DFT)を適用してパワースペクトルを得る。

$$p(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c(n) \exp(-i2\pi \frac{l}{N} n) \quad (2)$$

時間スケールは以下のごとくで表されるため、得られるプロットはサンプル数の半分となる。

$$\theta = \frac{2\pi}{N} \quad (3)$$

$$\{l(\theta) | \theta = 0, \dots, \pi\} = \{0, \dots, \frac{N}{2}\}$$

こうして得られたパワースペクトルから信頼性が低い低周波側0.05Hz未満を削除し、解析に用いる。

ISI=450ms及び600ms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.4a,b)。両対数プロット上でおおよそ直線分布とみなすことができ、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=1500ms及び1800msのパワースペクトルでは反比例関係を示さず、突出したピークが顕著に現われている(Fig.4c,d)。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、ある種の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にとりて最小二乗法で直線近似を行った結果 $y = x +$ から「傾き」を定義する。各ISIに対して全試行の平均を求めたところ、Fig.5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 有意ピーク数

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。

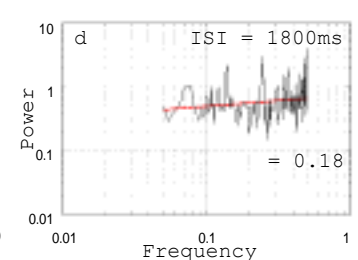
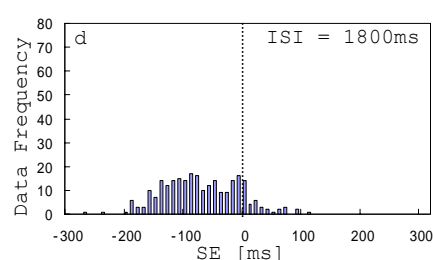
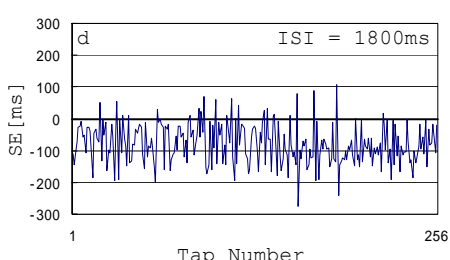
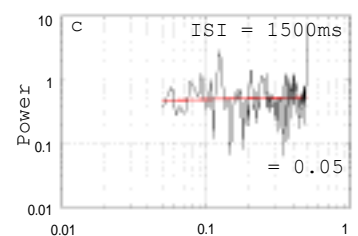
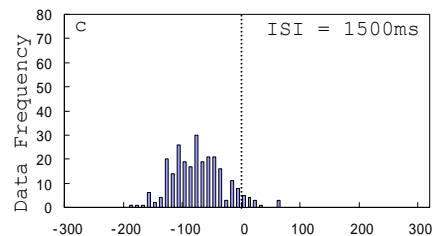
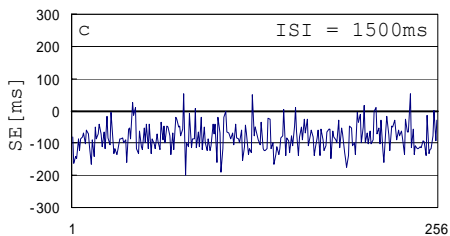
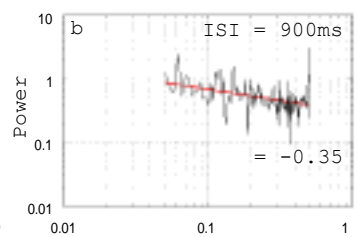
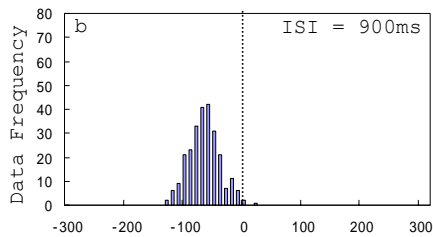
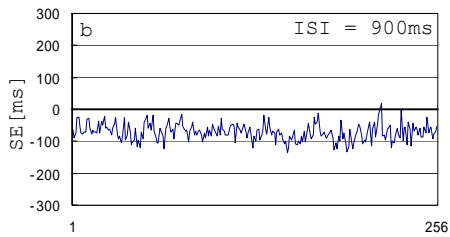
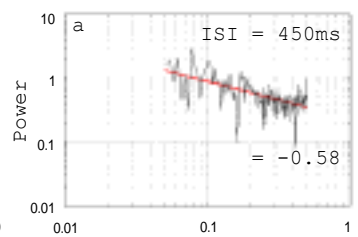
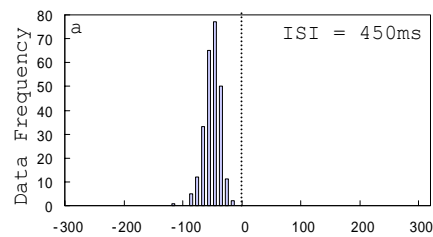
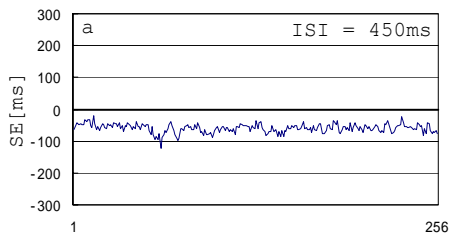


図2 SEの時系列
Fig.2 Temporal Development of SE

図3 SEのヒストグラム
Fig.3 Histogram of SE

図4 SEのパワースペクトル
Fig.4 Power spectrum of SE

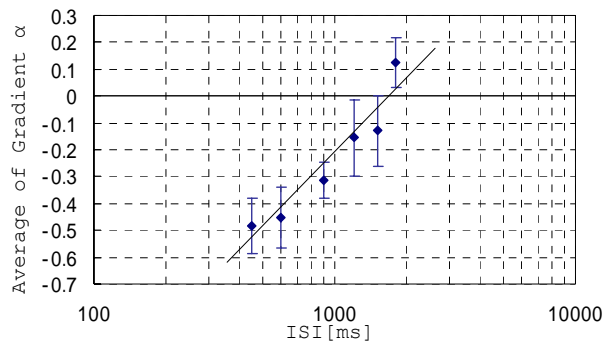


図5 傾き α の ISI 応答
Fig.5 Gradient of power spectrum
with respect to ISI

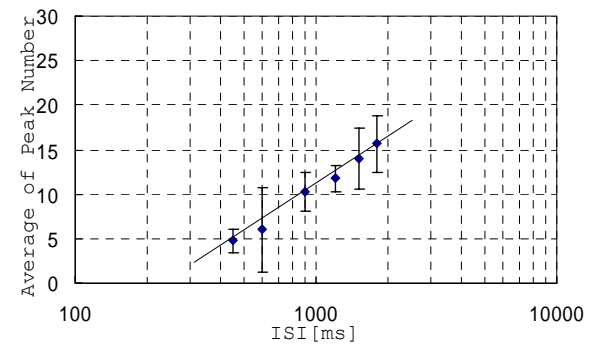


図6 有意ピーク数の ISI 応答
Fig.6 Mean counts of "significant peak"
with respect to ISI

このようなスペクトルの指標を定める。両対数プロット上の回帰直線となる前記の近似から、Y 軸正方向に上回った距離を各周波数について導出し、これを「パワー差分 Power(f)」と定義する。そして、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(4)に従って Power(f)が閾値 0.3 を超えた場合に有意ピークとし、その数をカウントする。

$$\begin{aligned} Peak(f) &= 1(\text{Power}(f) \geq 0.3) \\ Peak(f) &= 0(\text{Power}(f) < 0.3) \end{aligned} \quad (4)$$

$$Peak = \sum_{f=0.05}^{0.5} Peak(f)$$

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.6 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。

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^[11]、という知見と関連付けられることが予想される。

短ISI側で顕著に見られる自己相似型の特性は、傾き α がかなり-1へ近づいており、1/fゆらぎに近いものとなっている。たとえば集団ペースメーカー細胞に由来する心拍周期についても、特定周波数ピークと1/fゆらぎを組み合わせたスペクトルになっていること^[12]が報告されているが、ゆらぎについては薬理遮断による実験から、副交感神経の関与が指摘されている^[13]。このように、自動的なリズム生成系と上位の神経系からの調節という組み合わせが、生体リズムに見られる1/fゆらぎの中で広く見られるのは事実である。ISI=450~1500msのSE変動自体に含まれるフィードフォワード性を示した前例も併せて考慮すると、小脳における運動タイミング制御はフィードフォワード的であることから、ここで述べた神経系からの調節に相当している可能性も示唆される。

一方、長ISI側で顕著に現れる特定周波数のみに支配された固有周期型の特性は、感覚入力によるフィードバック的なプロセスの介在が考えられる。これは、被験者に与えられたリズム刺激の周期と有意に対応した自己相関成分や強い周波数成分が現れているからである。すでに、長い周期(ISI=1500)の同期タッピング課題において、タッピング間隔に有意な負のC(1)自己相関が現れるとの報告より、フィードバック処理機構の関与が指摘されている。これらより、刺激入力周期とタッピング周期との間

で誤差をフィードバックすることで、タイミングを維持しているのではないかとの推測は可能である。

5. まとめと今後

われわれの研究グループは、人間の備えるインターフェイスが主観時間をもって実時間との同調を測っていることの表出として、感覚運動連関における負の非同期現象(Negative Asynchrony)に注目してきた。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^[11]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行きたい。

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 accerating 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] 三宅美博, 場と共創 (分担: "コミュニケーションと共生" 第4章 pp.339-397), NTT 出版, 東京 (2000)
- [7] 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとしての人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, 37-11, 1087/1096 (2001)
- [8] 高梨豪也, 三宅美博: 共創型介助ロボット"Walk-Mate"の歩行障害への適用, 計測自動制御学会論文集, 39-1, 74/81 (2003)
- [9] 三宅美博, 辰巳勇臣, 杉原史郎, "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)
- [10] 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)
- [11] Y.Miyake, Y.Onishi & E.Poeppel, E: "Two types of anticipation in synchronous tapping," *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 415/426 (2004)
- [12] M.Kobayashi and T.Musha: 1/f Fractuation of heartbeat period, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 29, 456/457 (1982)
- [13] Y.Yamamoto, Y.Nakamura, H.Sato, M.Yamamoto, K.Kato and R.L.Hughson: On the fractal nature of hert rate variability in humans effects of vagal blockade, *Regulatory Integrative Comparative Physiology*, 269-4, R830/R837 (1995)