

予測的タイミング同期に現れる2つの動的特性

東京工業大学 ○小松 知章, 三宅 美博

Two spectral features of anticipatory timing syntonization

○Tomoaki Komatsu and Yoshihiro Miyake Tokyo Institute of Technology

Abstract: It is well known that the sensory-motor coupling represents negative asynchrony phenomenon in which motion timing precedes the onset of stimulus. However, in such previous researches, the tapping task has been investigated by statistical analysis of synchronization errors. Therefore, in this report, we used time-series analysis and it was shown that anticipatory behavior in sensory-motor coupling is composed of two different dynamics corresponding to two types of anticipatory timing control.

1. はじめに

ミリ秒レベルで身体運動のタイミングを合わせるには、それに先立つ伝達・処理タイムラグを予め折り込む必要がある。また対面コミュニケーションでは、2者の身振りが円滑な同調を達成しようとする先行的に運動すること等が知られている¹⁾。かように人間は、感覚入力～認知処理～運動応答という受動的情報流れ、およびその積み重ねとしてのアクション・リアクションという枠組みから踏み出したところで、時間遅れに対処しようとする予測的挙動を実現している。

インタフェースを「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フェースがこうした機能を持ち得ているのは、高度な内外イベントのタイミング合わせ——認知上などの言わば“主観”時間と実時間との同期——によるものと考えられる。これは、人間の協調プロセスを共創的に支援しようとする人工物²⁾を目指す我々の研究グループにとっても、ユーザー-人工物間で各々の内部時間を同期させようとするインタフェースの雛型として興味深い。

2. 研究俯瞰

そうした予測性の端的な表出として、我々は『負の非同期(Negative Asynchrony)』³⁾に注目してきた。周期的な感覚刺激に対して身体応答を同期させる感覚運動連関において、応答が定常的に数10ms程度先行する現象である。Negative Asynchronyを捉える実験系としては、応答に指運動を用いる『同期タッピング課題』が存在する。刺激周期とNegative Asynchrony生起との関係を探る⁴⁾よ

うな定性的観察にとどまらず、脳障害ケースをリズム面から弁別した事例⁵⁾、2sec内外より長周期の刺激下でワーキングメモリの関与を指摘した事例⁶⁾などが報告されている。この様にタッピング課題は、人間の備えるインタフェースが実現している前述の巧みな内外タイミング同期への足掛かりを目指した、生体リズムの時系列データを簡易に取得しうる系としての有効性が期待できる。

ここより得られる非同期量の解析手法について、本研究グループはNegative Asynchronyを新たに時系列データとして捉え、従前用いられてきた平均・分散・ヒストグラムなど時系列性の希薄な統計手法から、ダイナミクスへと一歩踏み出した解析を行うものである。

3. 実験と解析

3.1 同期タッピング課題

従来のタッピング課題⁵⁾⁷⁾同様、被験者に周期的な聴覚刺激を与え、応答の指運動(タップ)を電気的に検知する。被験者9名には、音に可能な限りタイミングを合わせタップするという課題を与える。試行中一定をとる刺激周期(ISI)は450～6000msで与えられ、音パルスに対するタップ発生時間差について遅れ方向を正で表した非同期量(SE)を計測。SEデータ列に離散フーリエ変換を適用してパワースペクトルを得る。

3.2 周波数特性の概観

ISI=450のデータA(Fig.1a)およびISI=2400のデータB(Fig.1b)の2サンプルについて、各々(1)SE生データ・(2)ヒストグラム・(3)スペクトルの両対数プロットを示す。

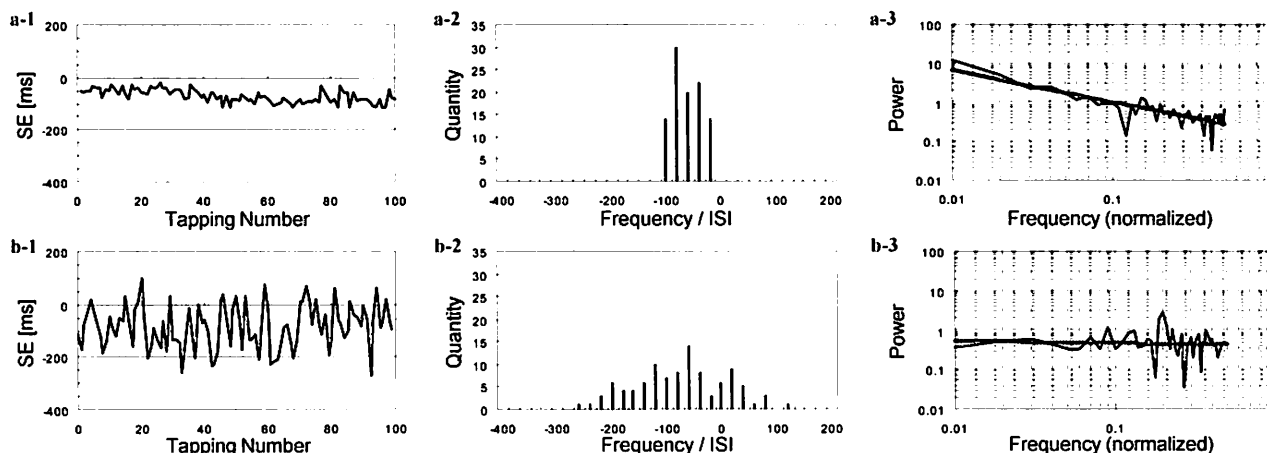


Fig.1 Typical example of Synchronization Error (SE) distribution (1), its histogram (2), and its power spectrum (3). a Stable anticipatly tapping in a short (450ms) stimulus interval (ISI). b Unstable anticipatly tapping in a long (2400ms) stimulus interval. $normalized\ frequency = frequency \times ISI / 1000$

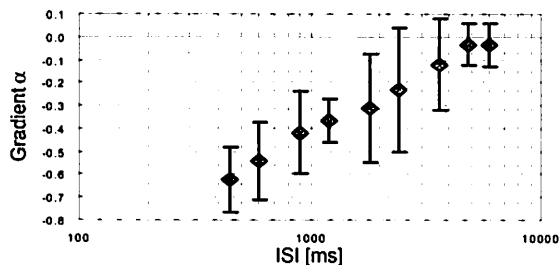


Fig.3 Average gradient of power spectrum with respect to ISI.

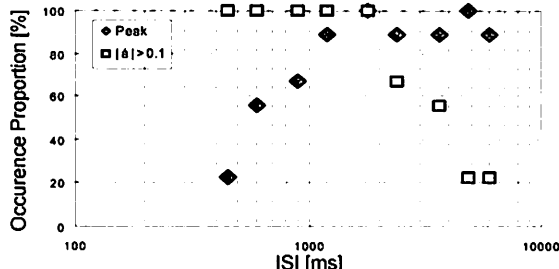


Fig.5 Occurrence proportion of two features on power spectrum. Light square is probability of "1/fⁿ-Feature" (with gradient $\alpha < -0.1$). Dark circle is probability of "Periodic-Feature" (with differential Power(f) ≥ 0.4 in any frequency).

データ A では周波数 - パワーが反比例の関係を示していた (Fig. 1a-3). 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。これを本稿では『1/fⁿ型特性 (1/fⁿ-Feature)』と呼称する。

一方データ B はこれまで、安定的な Negative Asynchrony の生起が失われる (Fig. 1b-2) おおよそ 2sec 以上の長 ISI 域としてのみ知られてきたが、スペクトル上では特定周波数で顕著なピークが現れ、それ以外の周波数領域はホワイトノイズを呈している (Fig. 1b-3). 固有の周期性に強く依存する動的特性であり、これを本稿では『固有周期型特性 (Periodic-Feature)』と称する。

3.3 特性量の抽出

しかし実際、かようにスペクトルパターンが一方の特性を顕著に示す試行は稀であり、実際は双方ともに見られる試行が大半である。様々なパターンを呈するスペクトルの特徴を定量的に評価するため、本研究グループはプロフィールを、互いに干渉しない特性量へと分解して表す。1/fⁿ型の特性量として、Fig. 1a-3, 1b-3 中に淡色で示した 1 次近似の『傾き α 』(累乗近似における乗数に相当する)。固有周期型の特性量としては、そこからの各周波数におけるパワー差分 Power(f)——今回はそこから閾値 0.2 以上の高いパワーを示す周波数をカウントした『ピーク数 Peak』。その 2 つである。

3.4 2 つの特性分布

この 2 特性量が ISI に対してどのような出現傾向にあるかを検討する。傾き α の被験者間平均は短 ISI 域で大きく、つまり強い揺らぎ性 (1/fⁿ 程度) を示すが、ISI 伸長につれてホワイトノイズ化する (Fig. 2)。一方、ピーク数 Peak は ISI=1800 を最多とし、特に短 ISI 側へ向けて著しく減少している (Fig. 3)。

ここで α とピーク、2 つの特性量分布を示す (Fig. 4)。後者については単純化のため、Power(f) の閾値を 0.4 以上にとってピーク有無を判別する。長刺激周期では 1/fⁿ 型が、短周期では固有周期型の

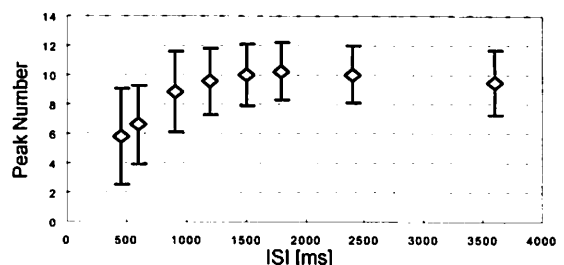


Fig.4 Mean counts of "Peak" (with differential Power(f) ≥ 0.2) with respect to ISI.

特性量が失われ、ISI=1200~1800ms 範囲では両者ともに現れている。

4. 考察および総括

本研究は従来の統計手法から求められなかった、Negative Asynchrony の非同期量変移が包含する 2 つの動的特性を見出した。1 つは主に短 ISI 域で「フラクタル性の強い揺らぎを持つ」もの、いま 1 つは主に長 ISI 域で「固有の周期性に従う」ものである。そして両者の支配的出現率が交代する境界、刺激周期 1200~1800ms は、心理課題の適用より従来指摘されていた境界と一致する。すなわち長・短周期領域は異なるタイミング制御機構から成り、前者はワーキングメモリが関与、後者はフィードフォワード性が強く自動的に制御されるという先行研究での知見⁷⁾を、異なる面から補強する材料と考えられる。

しかし一方で課題も積み残している。確かに挙動のプロフィールとして波形組成を見ているという点で「動的」特性だが、あくまで振動を定常と見なしての解析でしかない。これを踏み台として非同期量の時間発展を解析した結果は、次の機会に示したいと考えている。

今回の結果は、着眼と解析の切り口次第で Negative Asynchrony から人間が実現している内外時間同期ダイナミクスへ迫る情報を掘り出しうる、という有望性を示している。また冒頭でも触れたが、我々の扱ってきた「身体運動をメディアとしてリズム同期を行う」人間 - 機械系の共創インタフェース²⁾³⁾が示す Negative Asynchrony についても、今回の 2 特性量を注視した解析は有効であろう。そこから、新たな共創モデル構築への足掛かりが得られるのではないかと期待される。

参考文献

- 1) エドワード・ホール: 文化としての時間 (宇波彰訳), TBS ブリタニカ (1983)
- 2) 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 339/397, NTT 出版, 東京 (2000)
- 3) 三宅美博, 宮川透, 田村幸健: 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)
- 4) P. Fraisse: The sensorimotor synchronization of rhythms. In J. Requin (Ed.), *Anticipation et comportement*. Centre National, Paris, 233/257 (1980)
- 5) J. Mates, T. Radil, U. M. J. Iler and E. P. Poppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6-4, 332/340 (1994)
- 6) H. Yoshinaga, S. Miyazima and S. Mitake: Fluctuation of biological rhythm in finger tapping. *Physica A*, 280, 582/586 (2000)
- 7) 三宅美博, 大西洋平, エルンスト・ベッペル: 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, 38-12, 1114/1122 (2002)