

同期タッピングにおける非同期量時系列の自己相似性

東京工業大学 ○小松知章, 東京工業大学 三宅美博

Self-similar synchronization error in synchronization tapping task

Tomoaki Komatsu and Yoshihiro Miyake

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

Key Words: time perception, synchronization tapping task, time-series analysis, self similarity

1 はじめに

たとえば音楽でもスポーツでもよい。幾多の人間が協調している時、人間の神経伝達におけるタイムラグは、本来ならば容易にその系を崩壊へと導きうる。例を挙げれば、他者の音を聴いてからそれに反応している、奏者間の遅れ蓄積でアンサンブルが成立しなくなるのは自明である。しかし実際の人間は巧みにこの問題を回避し得ているため、それを補償するものとしてリズム・タイミングを内的に生み出す機構が存在するのではないかと考えられる。

この問題を非常に単純化した系で表すものに『同期タッピング課題』があり、これは周期的に与えられた感覚刺激に被験者が指タップ運動を同期させる、という実験系である。同課題で、運動応答つまり出力が、感覚刺激つまり入力に先行するという負の非同期現象が知られている¹⁾。そして負の非同期状態であれば、“応答”タイミングはその実、応答ではなく内的に生成されたものに他ならない。よってこの実験系において負の非同期状態を積極利用することは、同課題に迫る切り口として適切であると考えられる。

生成されたタイミング時系列を評価する一指標として、指タップと感覚刺激との時刻ズレの大きさを示す非同期量(以下SEと称す)があり、SE時系列の特性については既に幾つかの知見が存在する。おおよそ1000ms未満の限られたISIで、固定的に $1/P^6$ 程度を報告したもの²⁾や、 $ISI=450\sim 6000$ で約 $1/P^6\sim$ ホワイトノイズという応答的なスペクトル指数の降下を報告したもの³⁾等である。定量的な値の差異はあれ、そこに $1/P^6$ 型の変動特性が存在している。

これまでタイミング同期については、主にそこへ生じる誤差をどう補正しているかという観点からのみ、その機構が追求されてきた⁴⁾。収束して定常状態へ至るそれらのモデルでは、 $1/P^6$ 性は扱っていないことが1つの問題であった。

だが一方、 $1/P^6$ 性をもって内的タイミング生成ダイナミクスに自己相似性の内在を断言して差し支えないかといえ、そこにも問題があった。まずは観察される側だが、いかなる時間尺度においても等しい長時間相関が存在する、つまり無限に低い周波数まで均質な自己相似構造が続くと安易に断言するのは、現実のシステムを取り扱う仮定としては軽率であろう。観察する側にも問題がある。自己相似構造なら観察スケールに対する不変性を持つ筈だが、周波数解析とはある一定時間長に固定して定常波形を仮定する手法であるため、それのみで自己相似と断定することは不可能となってしまふ。

本研究は、タイミング生成機構自体に対する議論の限界と、そもそも対象自体の検討が不十分であったという、その点を2つながら打破するため、非定常時系列に内在する自己相似性の検証に優れた、新たな解析手法を導入する。

2 研究手法

2.1 課題概要

これまで同期タッピング課題として行われてきたもの¹⁾³⁾と同

様、被験者に周期的な音パルスで聴覚刺激(以下これをBEATと記す)を供給し、その応答としての指運動(以下これをTAPと記す。BEATともどもミリ秒を単位とする)を電気的に検知する。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、という課題が与えられている。

実験設定上の可変項はBEAT周期を示すISIであり(Fig.1)、試行間で可変、試行内では固定される。また、測定する特徴量はSE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、遅れ方向を正として表したものである(Fig.1)。

2.2 被験者

課題の遂行は、ボランティアの大学院生(20~30代男)9人に依頼した。これら被験者はいずれも聴音に障害を覚え、応答の押し下げ動作は、右手人指し指にて行った。

2.3 実験システム

BEAT生成は、PC(IBM ThinkPad560E)内蔵のリアルタイムクロックと、シングルタスクOS(IBM PC-DOS2000)上のプログラムにより、時間分解能 $1/1024\text{sec}$ で行った。TAPの記録も同精度で、RS-232Cポート経由の同PCに行わせている。求めた時間分解能が得られていることは確認を行った。

聴覚刺激は、500Hzのものを1BEATあたり100msずつ持続させ、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。BEATと異なる雑音源(環境音・TAPスイッチ音など)は、低減・排除に配慮した運用を行った。

また課題遂行中は瞑目を前提とし、さらに手足など身体の一部を動かしてリズムをとることおよび、特に長ISIにおいて意識的に分割カウントをとる(例えば3600ms周期を900msに4分割して捉える)ことは禁止されている。

2.4 パラメタ設定

試行ごとの可変項であるISIの設定は $450\sim 3600\text{ms}$ の範囲内で、 $ISI=\{450,600,900,1200,1500,1800,2400,3600\}$ の8通りに設定した。1回の試行はいずれも765BEATから成り立っており、最初の10BEATおよび最後の5BEATを除いた750BEATを、実計測値として採用した。おのおのISI条件で1試行ずつ計8試行を1セットとし、被験者の疲労を避けるため2日に分けて4試行ずつ遂行させた。

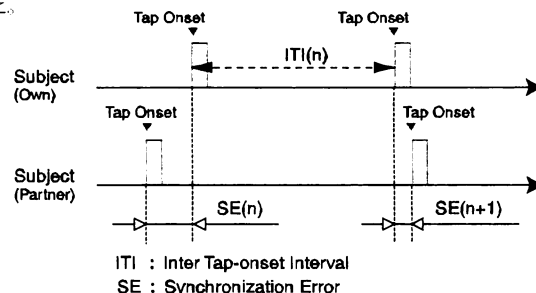


Fig.3 Timing-Chart of temporal relationship between taps and auditory stimuli.

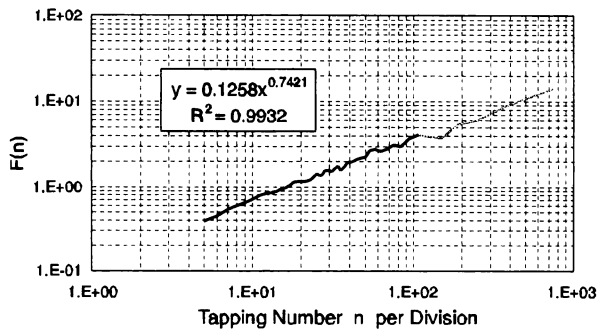


Fig.2 F(n)-n plotting of DFA example in ISI=1500.

3 結果

3.1 自己相似性解析

自己相似性を定量的に評価するため、非定常時系列データであり1/f性が確認されている心拍揺らぎの解析⁹⁾で有効に用いられた例もある、Detrended Fluctuation Analysis(以下DFA)を導入した。

ISI=1500でのSE時系列サンプルに対して、最多で150分割まで等分しブロックあたりデータ点数 $n=5 \sim 750$ TAPまで解析した結果を、 $F(n)$ - n プロットで示す(Fig.2)。黒プロットされた $n \leq 107$ は直線近似可能であり、 $R^2=0.9932$ と、非常に良い近似(疑似乱数によるホワイトおよびブラウンノイズに対するDFA解析でおおよそ $0.97 < R^2 < 1$)が得られている。自己相似性が認められる同範囲におけるスケーリング指数0.74は、スペクトルにして $1/f^{0.48}$ に相当する。しかしそれより少ない分割数では近似から逸脱している。

同様に107~250TAPを試行ごとに異なる上限とし、それ以下のブロックサイズではISIを問わずほぼ全データで n によるスケーリング則が成立している。つまり無限に長周期まで均一な自己相似性が成立してはならず、その程度の時間尺度を上限とする局所的な自己相似性が確認された。

そこで、スケーリング則が確実に成立するようブロックサイズ $n=5 \sim 107$ TAPに限定し、そのスケーリング指数から変換した $1/f^\beta$ の対ISI応答をFig.3に示す。ISI伸展に対して指数 β は低下しており、100TAPの定常周波数解析におけるパワースペクトルの傾き値³⁾と、定性的に同じである。ただしISI=3600においては、例外的に2試行が $n=75$ 程度のより小さなボックスサイズ上限を呈したため、同ISIにおけるスペクトル指数 β は参考結果とする。

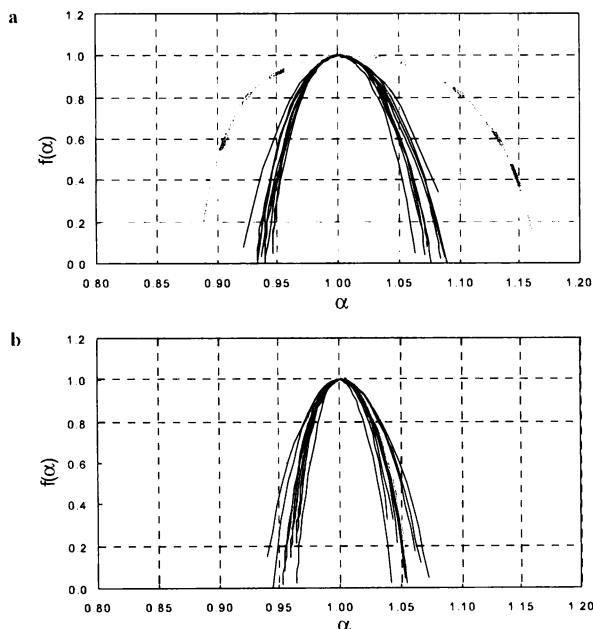


Fig.4 Examples of Singularity Spectrum in a) ISI=450 and b) ISI=2400.

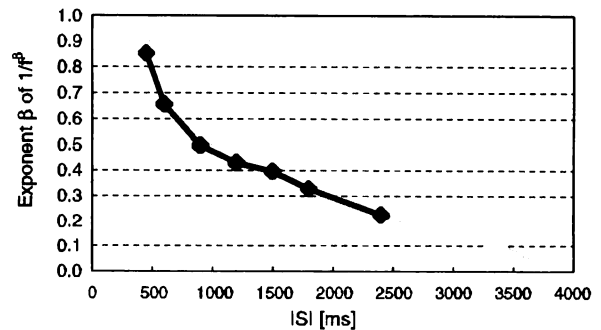


Fig.3 $1/f^\beta$ property from DFA with respect to ISI ($n=9$).

3.2 フラクタル性解析

続いて、ボックスカウンティングに基づく『モーメント法』をSE時系列に適用した結果を示す。Fig.4は、ボックスの分割数より得られる δ および乗数 q による $N(q, \delta)$ - δ プロットをルジャンドル変換して得られる特異性スペクトル($f(\alpha)$ - α プロット)である。各試行のSEデータからランダムに順列を入れ換えたデータ列を10セット作成し、それと本来のデータとで特異性スペクトルを比較している。明灰色プロットが実データを示す。

ISI=450~1800までの全試行はRSサロゲートに対して α 分布幅が広く、マルチフラクタル性が認められる(サンプルとしてFig.4a)。ISI=2400, 3600においては、44.4%の試行がサロゲートと同じスペクトルを示し(Fig.4b)、マルチフラクタル性が認められない。

4 考察及び総括

本研究は、感覚運動連関課題のひとつである同期タッピングにおける同期ズレ、すなわち非同期量時系列において、これまで $1/f^\beta$ 特性から示唆されてきた統計的自己相似性を明らかにした。またスペクトル指数が刺激の提示周期の伸展にもなって低下することも、定常的な既存の解析³⁾とは異なった手法にて示し、同知見を確実・明白なものにした。

加えて、刺激の提示周期が1~2秒程度より短い時間域では、非同期量時系列がマルチフラクタル性を持つことを示唆した。この高いスペクトル指数・マルチフラクタル性を示す短時間域では、既にタイミング合わせが高次脳領域を用いない自動的機構で行われると示唆されていた¹⁰⁾。これらの結果を総合することにより、短い時間長を担う自動的なタイミング生成機構のダイナミクスは、自己相似・マルチフラクタル性を持つという可能性が与えられる。

タイミング同期における位相誤差・周期誤差の補正機構についての議論は盛んであったが¹¹⁾、今回の結果から、それに留まらずより長々時間構造を持った現象モデルの構築が必須であることが、初めて明らかとなった。

参考文献

- 1) J.Mates, T.Radil, U.Müller and E.Pöppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol.6, No.4, pp.332-340 (1994)
- 2) Y.Chen, M.Ding and J.A.S.Kelso: Long Memory Process ($1/f^\beta$ Type) in Human Coordination, *Physical Review Letters*, Vol.79, No.22, pp.4501-4504 (1997)
- 3) 小松知章, 三宅美博: 同期タッピング課題における予測的挙動の時系列データ解析, *計測自動制御学会論文集*, Vol.39, No.10, pp.952-960 (2003)
- 4) B.H.Repp: Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, *Human Movement Science*, 20-12, pp.277/3 (2001)
- 5) P.Ch.Ivanov, L.A.N.Amaral, A.L.Golberger, S.Havlin, M.G.Rosenblum, H.E.Stanley and Z.R.Struzik: From $1/f$ noise to multifractal cascades in heart beat dynamics, *Chaos*, No.11, Vol.3, pp.641-652 (2001)
- 6) 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*, Vol.38, No.12, pp.1114-1122 (2002)