

研究報告書

「情報幾何学の計算論的神経科学への応用」

研究期間：平成 20 年 10 月～平成 24 年 3 月

研究者：三浦 佳二

1. 研究のねらい

脳活動などの、トレンドを持って時間変動するデータに対しては、定常性を仮定した従来のデータ解析手法では、必ずしも十分な情報が得られないため、非定常な時系列に対応できるデータ解析手法が必要とされている。特に、時系列のトレンドには“無限に多くの可能性”が存在する中で、その時間変動形に一切何の仮定も置かなくても揺らぎや相関などの高次統計量を推定できれば、大変有用なデータ解析手法となりうる。そこで、時間変動するデータから、時間変動しない情報のみを幾何学的に「射影」して取り出す数学的方法を考案する。仮にトレンドの可能性を場合分けしてプログラムを書いたとしても、“無限の可能性”に対応することは原理的に不可能であるが、これが情報幾何学の数学を有効に活用することで初めて可能となる。時系列データをこのような視点で捉えることで、脳科学を中心とした諸分野における重要問題の解決を目指した。

2. 研究成果

データ解析手法の開発としての数学的成果：

情報幾何学の1つの見方として、統計モデルに含まれるパラメタを「直交化」して応用に役立てる学問であると捉えることができる(図1)。

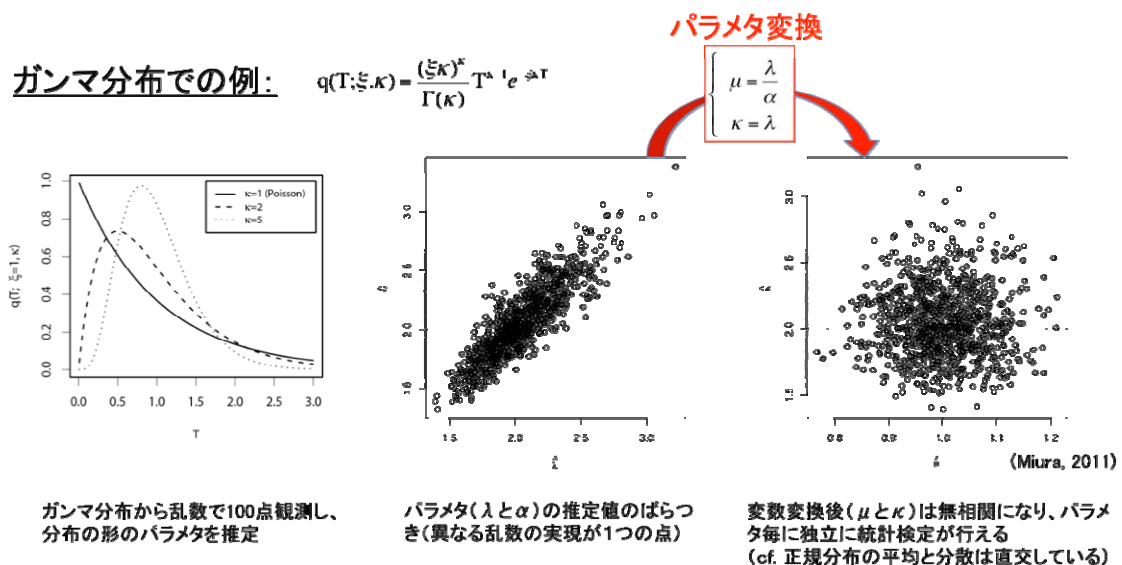


図1：情報幾何学の概略図

この情報幾何学の枠組みを、実質的に無限次元であるセミパラメトリックモデルに応用することで、無数にある「変動パラメタ」(例：平均値)がどのように変動しても、それを推定せず、有限個の「固定パラメタ」(例：相関)のみを正しく推定することができる(図2)。

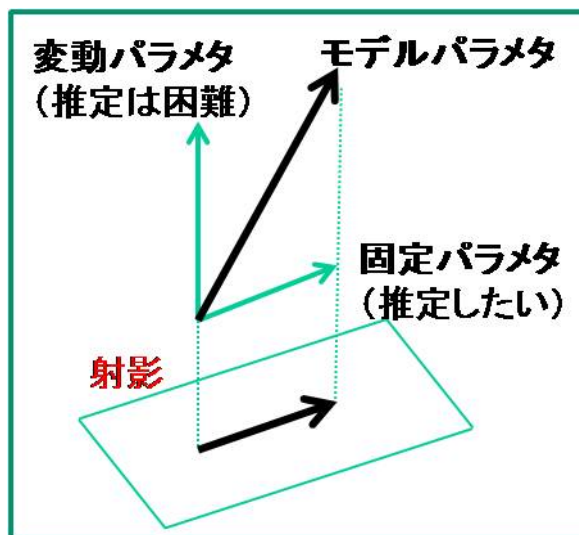


図2:情報幾何学の射影の模式図

この自由度の魔法を生かした枠組みを利用することを念頭において、脳活動等を確率モデルとして捉え、有益な情報のみを推定する方法の開発を目指し、次の3つの成果を得た(表1)。以下においては、これらを1つ1つ順に解説していく。

データの例	変動パラメタ	固定パラメタ
複数神経細胞の活動 (Miura, submitted)	シグナル (平均信号)	相関
神経細胞の発火パターン (Miura & Uchida, IEEE CDC 2008)	発火率	不規則性
動物の2択行動 (強化学習) (Miura, ICIAM 2011)	1つの選択をとる頻度 (行動価値)	同じ選択を続ける 傾向

表1:情報幾何学の枠組みでの推定に成功した例

1つ目の具体例では、任意のトレンドに対してノイズ相関を推定する方法を開発した。これを、脳活動の実データに対して応用した例においては、より時系列のトレンド成分を分離したノイズ相関を推定でき、ピークがクリアな相関関数を得ることができた（図3）。

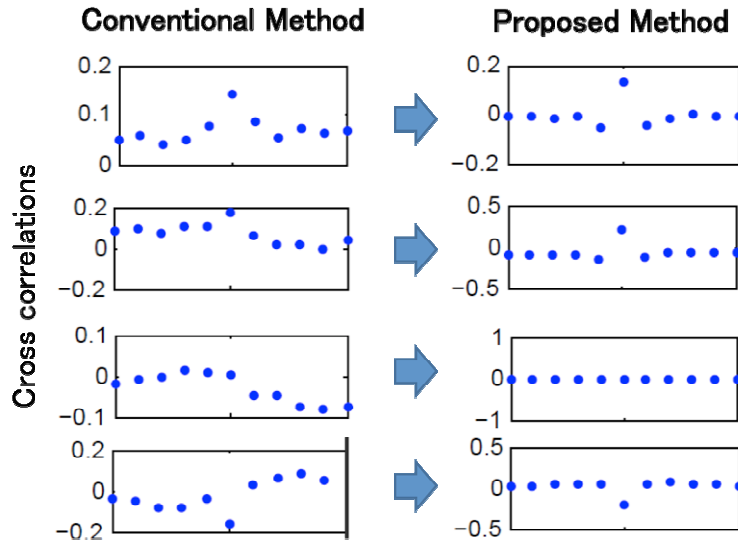


図3: 相関関数の推定, 提案法では同時刻($\tau=0$)のノイズ相関のみを正確に抽出できる

前の表の2つ目の例においては、神経細胞の発火パターン(点過程)のデータから、発火頻度が任意に時間変動していたとしても、不規則性(ガンマ過程のシェイプパラメタ)を推定する方法を、嗅覚皮質から計測した脳活動データに応用した。その結果、発火パターンの不規則性によって神経細胞を2個以上のグループに分類可能であることを発見した(図4)。

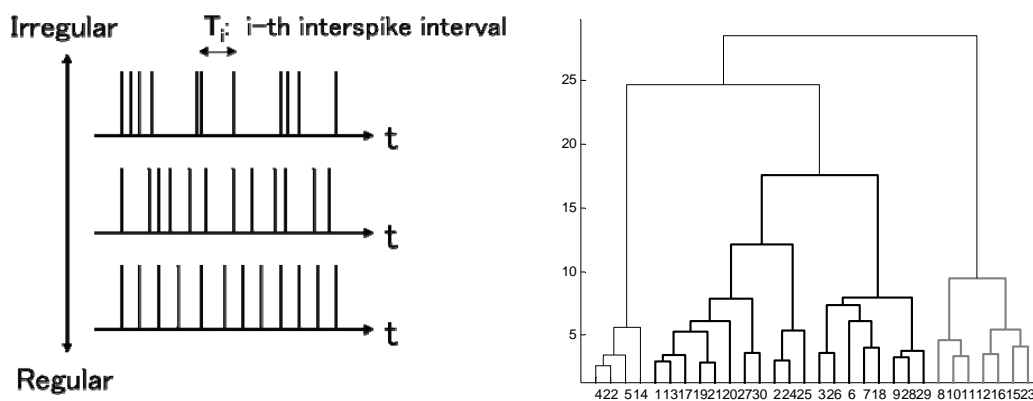


図4: 不規則性の異なるスパイクの例 / 不規則性を指標に用いた細胞のクラスタ分析

前の表の3つ目の例においては、バイナリー記号列(例えば0or1を並べたもの)に対して、0または1が出る頻度が途中で任意に変動しても、スイッチしやすさを推定する方法を提案した。

問題を解決する形での諸分野(脳科学)における成果

ハーバード大学内田直滋研究室への留学中の研究では、「無限とも言えるにおい物質の組み合わせを、脳がどう表現しているか」という大問題に挑んだ。特に、簡単な数理モデルから予言できる帰結として、神経活動にノイズ相関が存在すると脳の情報表現にとって都合が悪くなるという事実注目した（詳細は図5を参照）。

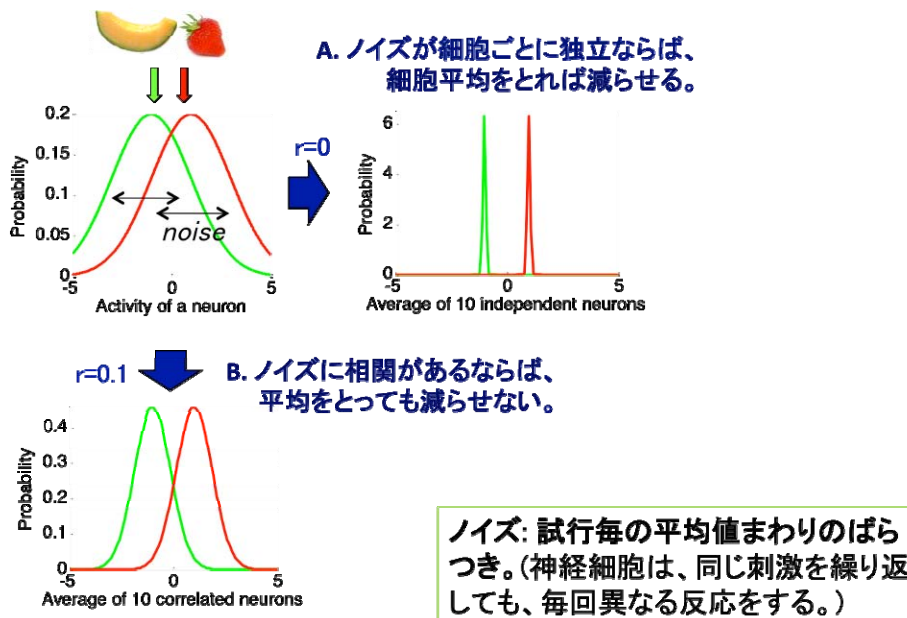


図5：不規則性の異なる単一神経細胞の応答は確率的で、刺激によって期待値が異なる（ ± 1 ）ガウス分布とする（左上）。ノイズの相関係数が0の場合（右上）と、0.1の場合（左下）の、10細胞の活動の平均値の確率分布。平均応答は細胞に依存せず、相関係数も細胞ペアに依存しないという、一様性を仮定している。（三浦, 2011）

この結論はモデルの詳細によらない普遍性があり、実験脳科学者も耳を傾けざるを得ない本質的な問題である。また、数理モデルとデータ解析の併用によって初めて解明できる問題でもあるため、数学の力を発揮しやすいと考えた。例えば、従来、視覚系の分野ではノイズ相関が実質的に存在すると言われてきたが、2010年にScience誌に出た2本の論文以降、(脳活動から人間の手でトレンド成分を引けば)ノイズ相関は0であると主張する学派が現れて論争となっている。これを和解させるためには、本研究課題において開発した情報幾何学的なノイズ相関の推定手法が有効であると考えられた。

そこで、我々は、嗅覚系から記録された神経活動を解析し、ノイズ相関を計算した。その結果、脳の別の場所から計測されたこれまでの全ての報告と異なって、(トレンド成分を引くまでもなく)神経細胞間のノイズ相関が無視できるほど小さいことを観測した。これから、嗅覚系では、独立で冗長性の無い細胞活動を利用して、1つ1つの神経細胞は精度が高なくても、集団として効率的な符号化を行うことを発見した(Miura *et al.*, 2009)、なお、結果的に、情報幾何学を用いてトレンドを除くための手法は必要なく出番がなかったが、今後、視覚系から記録されたデータ解析にぜひ応用したいと考えている。

3, 今後の展開

今後も、本研究課題の枠組みでデータ解析手法を開発し、それを利用した応用例を積み重ねていきたい。特に応用面でのブレークスルーを常に意識して、諸分野において重要な問題を解決したいニーズと、数学サイドから提案可能な方法論のシーズのマッチングを探求し続けたい。

4, 自己評価

限られた具体例に関して、今回の枠組みに即してデータ解析手法を提案することができた点については、本研究課題は成功を収めたと言える。しかしながら、必ずしも、時系列を生成するどのような確率モデルであっても、任意の変動に対応できる推定が可能となるわけではなく、解ける・解けないは問題設定に依存する。どこまでが解ける問題なのかの判定ができるようになれば更に一般的に有効な方法論となりうるため、その境界をよりクリアにしていくことが今後の課題である。

5, 研究総括の見解

外界世界を脳がどう符号化しているかは極めて大きな問題である。三浦氏はハーバード大学において無限とも言える臭い物質を脳がどう表現しているのか、という問題に取り組んだ。その際に神経活動にノイズ相関があるかどうかは極めて重要となる。すなわちノイズが細胞毎に独立ならば、細胞毎の平均でそのようなゆらぎは取り去ることができるが、そうでなければ問題は一挙に複雑となる。しかしながらノイズ相関の有無の判定は単純ではない。それはトレンドとよばれる平均値などの変動が実際の時系列には一般に含まれるからである。

これを取り出す手法として情報幾何学的手法を開発し、それを神経活動の発火パターンを始め、いくつかの重要な応用例に適用し成功したことは大きく評価できる。

この方法は問題の詳細によらない普遍性を持ち、従ってより広い時系列への適用可能性の拡大は今後大きなインパクトをもつと期待される。

6, 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| 1. Keiji Miura, Naoshige Uchida, A Rate-Independent Measure of Irregularity for Event Series and Its Application to Neural Spiking Activity, Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control 2008:2006-11 (2008/12/10) |
| 2. Kazuho Watanabe, Hiroyuki Tanaka, Keiji Miura, Masato Okada, Transfer Matrix Method for Instantaneous Spike Rate Estimation, IEICE Transactions on Information and Systems.2009; E92-D(7):1362-1368 (2009/7/1) |
| 3. Masafumi Oizumi, Keiji Miura, Masato Okada, Analytical investigation of the effects of lateral connections on the accuracy of population coding, Phys. Rev. E 81, 051905 (2010) (2010/5/5) |
| 4. 三浦佳二, ポピュレーションコーディングにおけるノイズ相関の影響, 日本神経回路学会誌, Vol. 18, No.2, 2011年6月号 (2011/6/5) |

5. Keiji Miura, An Introduction to Maximum Likelihood Estimation and Information Geometry, Interdisciplinary Information Sciences, Vol. 17 (2011) , No. 3, pp. 155–174. (2011/11/30)

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物等)

主要な学会発表:

1. Keiji Miura, Zachary F. Mainen, Naoshige Uchida, Near zero noise correlations and active sampling underlie fast population codes in olfactory cortex, Society for Neuroscience, Chicago, IL; 10/2009 (2009/10/18)
2. Keiji Miura, An unbiased estimator of noise correlations under signal drift, EASIAM 2011, Kitakyushu, Japan (2011/6/28)
3. Keiji Miura, Application of information geometry to neuroeconomics, ICIAM 2011, Vancouver, Canada (2011/7/20)
4. 三浦佳二, イベント発生時刻の不規則性, 東北大×北大 数学連携 Summer Institute, 札幌 (2011/8/19)
5. Keiji Miura, Naoshige Uchida, Impact of structured noise correlations on efficacy of population coding, Society for Neuroscience 2011, Washington DC (2011/11/15)