

令和 4 年 4 月 22 日現在

機関番号：14201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12184

研究課題名(和文) アクティブな情報探索の生理的メカニズムの数理的解明

研究課題名(英文) The physiological and theoretical mechanism of active information foraging

研究代表者

田中 琢真 (Tanaka, Takuma)

滋賀大学・データサイエンス学部・准教授

研究者番号：40526224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：生物のアクティブな情報探索システムを理解するため、ラットによるヒゲを使った情報探索の数理モデルを作成した。一次元の区間にランダムに「物体」が出現・消滅するとき、「ヒゲ」を走査して空間内の物体の位置をできるだけ正確に把握するヒゲの動かし方を導出した。ラットのヒゲの動かし方とは異なるパターンが現れたため、生理学実験との対応は十分に進められなかった。この研究と並行して、ノイズの強い環境の中での神経振動子のダイナミクスについての研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モデル主導で効率的な生理学実験を構成する手法を模索した。非常に単純な感覚運動系であるラットのヒゲを題材にして理論的な考察を行い、生物学的拘束条件の考察の重要性に光を当てた。これに加えて、ノイズ下で相互作用する位相振動子のダイナミクスで低次元記述が可能である場合を発見した。これは多体相互作用の系としては最も研究が進んでいる蔵本モデルの一つの拡張であり、同期現象の数理的理解に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：To understand the mechanism of active information foraging by animals, we constructed a mathematical model of the detection of objects with active whisking. In this model, we assume that objects randomly appear and disappear in a one-dimensional space and that a whisker scans the space to obtain information on the position of the objects. We derived the whisking algorithm that maximizes the information gain. However, because the whisking pattern generated by the model was inconsistent with the rats' whisking, we failed to compare the model with physiological experiments. Additionally, we conducted a study on a system of coupled phase oscillators driven by noise.

研究分野：理論神経科学

キーワード：情報 神経回路

1. 研究開始当初の背景

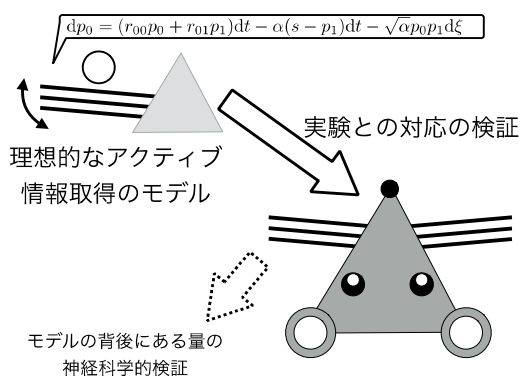
生物にとって感覚受容は必須の能力である。感覚は受動的だと思われがちだが、実は能動的(アクティブ)であることが知られている。そのため、感覚・感性を理解するためにはアクティブな情報探索を理解することが必要である。

アクティブな情報探索システムの例として、ラットのヒゲ感覚運動系がある。視覚が弱いラットにとってはヒゲは主要な感覚器官の一つである。また、ラットのヒゲは運動器官でもあり、どこにある物体を触るかを選べる。ラットのヒゲは、感覚器としては力のかかっている方向が検出でき、一本一本のヒゲに対応する部位が三叉神経核や視床 VPM 核にある(somatotopyがある)ことがわかっている。体性感覚野の細胞の活動は物体と接触したヒゲやヒゲが接触した時刻を表現することも知られている(Ramirez *et al.*, 2014)。ラットのヒゲの運動は central pattern generator (CPG)とも同期していて、呼吸のリズムとも同期していることが知られている(Moore *et al.*, 2013)。ヒゲは個別に動かすことができず、表情筋で全体をひとまとめに動かす(Haidarliu *et al.*, 2010)。特に、高速度カメラによる解析では、ひげの運動には、前後方向の中心位置と広がりぐらいいし自由度がない(2次元だけで制御される)ことがわかっている(Grant *et al.*, 2009)。言い換えれば、視覚系や肢運動系と違って、感覚も運動も自由度が低い(低次元系である)ことが大きな特徴である。

2. 研究の目的

以上のように、ラットのヒゲ感覚運動系は生物のアクティブな情報探索システムを理解するために優れたモデル系である。そのため、ヒゲ感覚運動系による情報探索を単純な数理モデルにして解析し、これを生理学データと対応させて比較すれば、神経系におけるアクティブな情報探索の機構を理解できると考えられる。本研究は、モデルによる予測を行い、これを実験データと対比することで神経機構を明らかにすることを目指した。

ラットがヒゲを情報探索のために使っているならば、単純な接触や単純な運動ではなく、情報探索の文脈の中におくことによって初めてヒゲ感覚運動系はよく理解できるのではないかと考えたのがこのアプローチをとった理由である。モデルを使うことによって、細胞が(実験結果を整理するとき便利な軸で集計することで見えてくるような)単に「振幅を表現するもの」や「前後を表現するもの」ではなく、それぞれ探索空間内の情報を担っているものとして解釈し、正しく分類できるようにすることを狙った。また、このアプローチによって実験を行うときにも、モデルによって予測したことを元に、より効率的に実験を組み立てることを目指した。具体的には、モデルにおいて物体の数が多いときと少ないときで特定の細胞の活動が高かったり低かったりすることが予測されているならば、実験においても物体の数を増やしたり減らしたりし、モデルにおいて物体の出現・消滅が頻繁に起こるときに特定の細胞の活動が高かったり低かったりすることが予測されているならば、実験においても物体の出現・消滅確率を上げたり下げたりしてみる、というような進み方を想定している。



3. 研究の方法

モデルは以下のように構成した。一次元の区間を考え、この区間にランダムに「物体」が出現・消滅するとする。この物体は区間内の点として表され、複数出現しうる。物体が全部で何個あり、現在どこにあるのかをできるだけ正確に把握する探索法を構成する。さしあたっては物体の出現・消滅は完全に時間的・空間的に独立であるとするとする。この環境の中で、物体の現在の存在確率についてのエントロピーを最小化するような探索法を構成する。物体の探索は区間内を連続的に走査することで行われるとする。時間と空間をととも離散化し、時間の一単位をステップ、空間の一単位をセルと呼ぶことにする。ヒゲは一本だけで、各ステップでヒゲが複数のセルを走査するとする。捜査した範囲内に物体があるか否かをヒゲは確率的に検知するが、物体が何個あったか、またどこにあったかはわからないものとする。ヒゲが存在する物体を検知できる確率は、ヒゲの運動速度に依存しているとする。このとき、各ステップで物体の存在確率のエントロピーを最小化するようなヒゲの移動先(走査範囲)を決定するアルゴリズムを構築し、このアルゴリ

ズムに従って運動するヒゲの挙動の一般的傾向を確認する。

また、同時にこのモデルの中の変数と、同様のアクティブな探索活動を行っているときのラットのヒゲ感覚運動関連領域の細胞の活動の間の対応関係を調べる。これによって、一見すると説明しがたい、もしくははっきりしない活動を示している細胞の役割を意味づける。

さらに、この研究と並行して、神経系の理論モデルを構築するための基礎研究も行う。具体的には、神経系も含めて生体内にはノイズが強いいため、ノイズの強い環境の中でのダイナミクスについての研究も行った。特に、これまでよく研究されており、神経細胞のモデルとしてもよく使われる位相振動子系がノイズの影響を受けている場合のダイナミクスを解析した。これによって、ヒゲの感覚運動系の神経細胞の情報処理およびダイナミクスのモデリングを改良することを試みる。

4. 研究成果

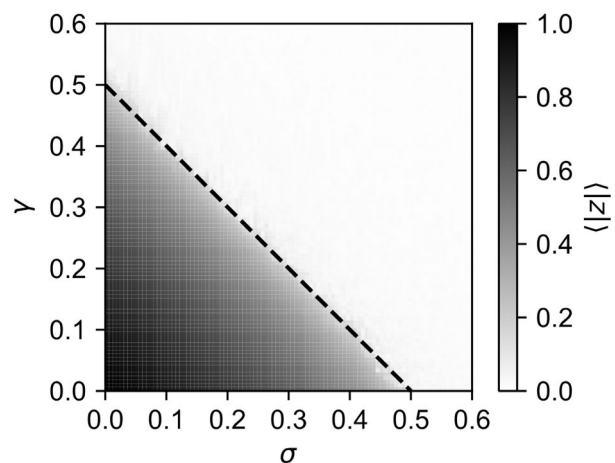
モデルは扱いを簡単にするため、セルにおける物体の出現確率がセルごとに独立である分布を仮定して、変分ベイズ的に確率を更新していくこととした。このモデルについて、物体検出の確実性、ヒゲの運動速度と確実性の関係、セルの数、物体の出現・消滅頻度などを変化させてシミュレーションを行い、傾向を調べた。セルを無限に細かくとり、ステップも無限小時間とした場合の極限でこのモデルを統合的に構成できるかを調べたところ、この極限をとるのが難しいことがわかった。

また、環境によって挙動は様々だが、このモデルではヒゲは時間的に不規則で、振幅も不規則に変動するような前後運動を行ったり、大きく動いてから突如小さく動いたりし、ラットの実際の行動とは対応をとりにくい動きをする傾向があることがわかった。そのため、生理学実験との対応を調べるのは難しいと判断した。

この問題を解決するため、ヒゲが概ね規則的に運動するような事前分布を入れたり、環境についての仮定を変更したりしたが、安定してヒゲの運動に近い動きを示すモデルを構築することはできなかった。ヒゲの本数を増やすことでより自然な挙動を作れるかも考えてみたが、すべてのヒゲを独立に動かす場合には(予想されることだが)不自然な結果になり、一方で複数のヒゲが連動して動く場合のヒゲの運動に対する妥当そうな拘束条件を見つけることができなかった。ある程度の妥当な拘束条件を見いだせればラットの実際の行動に近い結果になることを予期させる結果も部分的には出ており、継続した研究が必要である。

このモデルに含まれる変数は各セルにおける物体の存在確率を表す変数であり、ラットの感覚皮質もしくは運動皮質に対応するものがあるとすると、物体の存在を表現する細胞があることになる。細かい各点のみにおける物体の存在を表現する細胞のみが存在するのは不自然であるため、広い領域における物体の存在を表現する細胞もあって、階層的な構造をなしていることが想定される。このような階層構造をモデルに導入し、挙動が変化するかどうかを確認しようとしたが、モデルの適切な定式化が見つからず、成功しなかった。

理論モデル構築のための基礎研究については、以下の結果を得た。相互作用関数が正弦関数である位相振動子で、自然振動数がローレンツ分布(コーシー分布)に従っている場合を考える(蔵本モデル)。これらの振動子に各時刻において振幅がローレンツ分布に従う時間的に独立かつ振動子ごとに独立なノイズが入っているとすると、この場合、集団のダイナミクスがある低次元力学系に従うことがわかった。特にこの場合には、集団のダイナミクスに対しては、自然振動数分布の幅(右図の σ)とノイズの強度(右図の γ)とが全く同じ寄与をすることがわかった。これは、この種の位相振動子の相互作用によって生ずるダイナミクスが射影変換で表され、巻き込みコーシー分布がまた射影変換によって巻き込みコーシー分布に写ることによって発生する現象である。この成果は Tanaka, *Physical Review E* **102**, 042220 (2020)として発表した。ほかのグループによってこの結果をさらに拡張した結果(Tönjes and Pikovsky, *Physical Review E* **102**, 052315, 2020)もすでに公表されている。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka Takuma	4. 巻 102
2. 論文標題 Low-dimensional dynamics of phase oscillators driven by Cauchy noise	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 42220
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.042220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中琢真
2. 発表標題 ノイズを受ける位相振動子系の低次元ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋期大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

田中琢真のウェブサイト https://www.ds.shiga-u.ac.jp/ttakuma/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	古田 貴寛 (Furuta Takahiro) (60314184)	大阪大学・歯学研究科・講師 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------