

階層的生物ナビ学

「サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション」



CyNav

Hierarchical Bio-Navigation
Integrating Cyber-Physical Space

文部科学省 令和3年度
科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)
ニュースレター VOL.1
2022年1月

目次

領域のあらまし	p.3
計画研究の紹介	p.5
研究成果紹介	p.14
研究会報告：キックオフシンポジウム	p.21
体験記：若手向け企画 2021/12/24	p.22
体験記：異分野弟子入り	p.23

領域のあらまし:

階層的生物ナビ学



領域代表 橋本 浩一

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

本研究領域の目的

私達の世界は、ヒトを含む生物や人工物の活動で溢れています。本研究領域では、移動を中心とした個体レベルの活動を「ナビゲーション」（目的地にどのように到達するか）、ナビゲーションの上位にあたる他の個体や環境と影響しあう活動を「インタラクション」、そして個と集団が階層性をもって目的地へとたどり着く行為を「階層ナビゲーション」と呼びます（図1）。階層ナビゲーションはヒトを含む生物の行動の本質であり、生物社会と人間社会を支える基本的なしくみです。

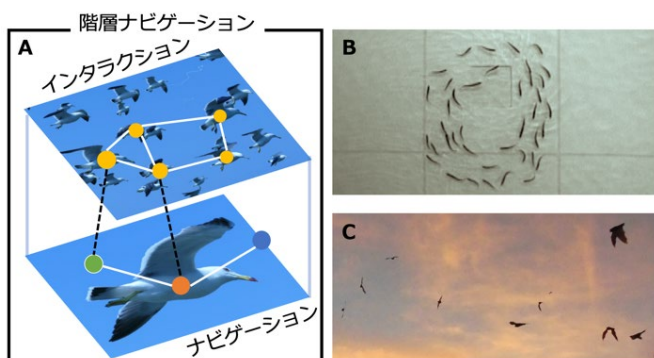


図1 様々な階層ナビゲーションと行動ダイアグラムのイメージ。Aにある●は移動に影響を与える様々な要素（エサ、目的地、他個体など）を示す。Bは魚の群れ、Cは空を舞うコウモリ。本領域ではこれらの種以外にも、線虫やマウスをはじめ多様な生物の移動現象を扱う。

本領域では、階層ナビゲーションの本質的な構成要素とその因果関係を解明するために、計測技術と情報科学的手法の開発を行います。そして、「階層的生物ナビ学」と名付けた新しい学問分野の創設を通じて、ヒトを含む生物の行動に関わる諸問題を解く方法論と技術の学術変革を目指します。

本研究領域の内容

本領域では、階層ナビゲーションの本質的構成要素の間の因果関係を「行動ダイアグラム」と名付けました（図1A）。たとえばエサを探す鳥は、仲間の後を追従したり、天敵が待ち構える場所を回避したりしながら、太陽や匂いなどの手がかりを使って移動していると考えられます。しかし、どの要素が重要で、各要素がどのようにインタラクションし、行動に影響しているのか答えるのは容易ではありません。そこで本領域では、最新の計測技術と情報科学的手法をシームレスに結合した研究プラットフォーム「χ（カイ）ログボット」の開発に取り組みます。χログボットとは、人工知能（AI）を用いて行動の計測と介入（対象への実験的な働きかけ）を自律的に制御し、階層ナビゲーションを解明するための実験を自動化する、AI駆動

型実験ロボット(Logbot: Logging Robot)です。χログボットを動物に装着したり、環境に設置したりすることで、フィジカル空間（実世界）で行われる計測から、サイバー空間（コンピュータ上）で行われる分析・介入方策決定までのサイクルを自動化します。本領域では、この新たな実験方法論を「シームレスCPS」(Cyber Physical System)と呼び、数理モデルや機械学習モデルの構築と検証を繰り返して行動ダイアグラムを精錬する枠組みを実現します。

期待される成果と意義

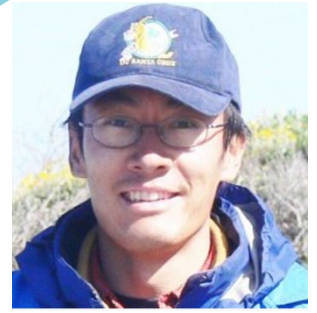
本領域の進展により期待できる中心的な成果は以下の3点です。(1) 革新的デバイス「χログボット」等の先端的行動計測を通して、これまでに得られなかった生物の階層ナビゲーション情報を高精度に取得でき

るようになります。なぜ渡り鳥は道に迷わないのか、魚はなぜ大集団で移動できるのかなど、生物の移動にまつわる謎の解明が期待できます。(2) 「シームレスCPS」という新しい方法論により、多様な階層ナビゲーションモデルの提案やその検証が可能になるとともに、そのプロセスを通して、生物・ヒト・モノの移動情報を分析するための情報学的基盤が整備されます。生物・ヒト・モノの移動について、意外な共通性や多様性を見つけることができるかもしれません。(3) χログボット上で計測・分析・介入方策決定・介入のサイクルを繰り返すことで、生物学、工学、情報科学のそれぞれの分野を相乗的に発展させます。将来的には、本領域で得られる成果を様々な社会的・工学的課題へ応用することも期待できる他、我々の「移動観」を革新する可能性も秘めています。



計画研究 A01 フィジカル班:

多次元バイオリギングによる野生動物のナビゲーションの多階層的理解



依田 憲

名古屋大学・環境学研究科・教授

複雑に変化する自然環境下において、野生動物はどのように情報を抽出・処理して階層ナビゲーションを行うのでしょうか？本計画研究班では、野生動物の中でも特に機動力に優れた大型の鳥類と哺乳類を対象として、行動や情報処理にかかるコストや、行動による利益を実測して、階層ナビゲーションを支える行動ダイアグラムを解明します。

この目標に向けて、A02 サイバー班と共同し、環境・生理・行動パラメータを野外計測する装着型χログボットを開発します。χログボット等の先端的バイオリギング装置（動物に装着するロガー）の他にも、

小型ドローンを利用して野外調査を行い、データを取得後、環境・行動・生理情報の統合的解析を行います。これらのデータを行動ダイアグラムに基づいてモデリングすることによって、外的環境から感覚生理を経て行動に至るまでの基本的な挙動を理解し、渡り・回遊や集積的意思決定などの階層ナビゲーションを支える機構と適応を明らかにします。

さらに、構築した行動ダイアグラムを利用して、鳥類の移動を考慮した風力発電の設置立案や、ウシ目・ウマ目の移動管理計画、各種野生動物の保全に貢献する知見の公開など、社会的に重要度の高い課題に取り組みます。

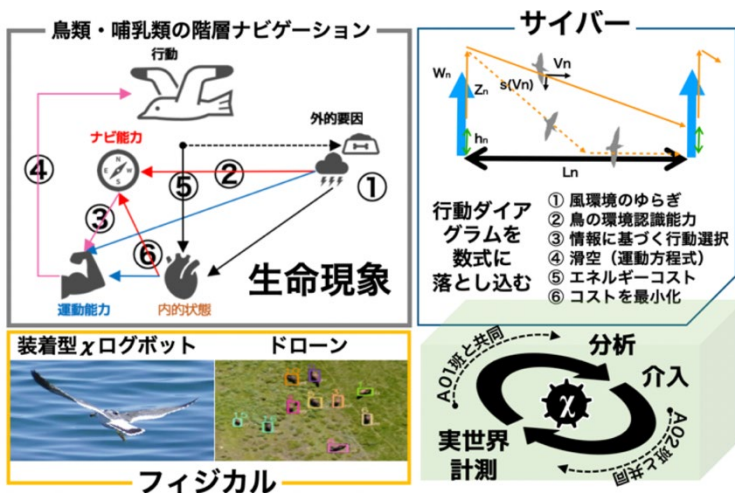
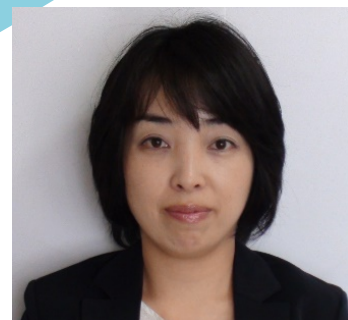


図1 フィジカル空間における計測を、χログボットを含む多次元バイオリギングや小型ドローンを用いて行い、サイバー空間で行動のモデル化や予測を行います。数理モデル（行動ダイアグラムを数式に落とし込む）や統計モデルを駆使して、様々なスケールで複雑に変化する野外環境下で、野生動物がどのように移動しているのかを明らかにします。装着型χログボットには、新たに行動介入機能を搭載し、自由行動下の鳥に天敵の声を聞かせるなどして、行動ダイアグラムにおける本質的な要因を探索したり、要因間の因果関係をつきとめたりします。A01班、A02班との積極的なコラボを行い、次世代のバイオリギング技術の創出に挑戦します。

計画研究 A01 フィジカル班:

音響サイバー空間を利用した コウモリの階層ナビゲーションの理解



飛龍 志津子

同志社大学・生命医科学部・教授

コウモリは「生物ソナー」とも呼ばれ、超音波によるエコーロケーションによって周囲環境を把握しています。そして優れたナビゲーション能力を持つ飛翔動物でもあります。本研究はコウモリのモデル動物としての利点を活かし、モノや環境などとのインタラクションを含む個体レベルのナビゲーションから、より複雑な集団レベルに至るナビゲーションの解明を目指します。実験室から野外環境まで、さらに工学から生態学に至る幅広い手法を用いてコウモリのナビゲーション能力を高度に計測し、動物の意思をデザインする「行動ダイアグラム」を明らかにしたいと考えています(図1)。たとえば、知覚に関わる入力が音響情報に限定されるコウモリを用いることで、彼らがエコー

ロケーションによって取得する周囲からのエコーを音響数値解析的に取得できれば、動物の知覚空間を再現できることに着想した「音響サイバー空間」を構築します。さらにフィジカル空間での行動実験とシームレスに連動させることで、フィジカルには計測が難しいナビの意思決定に寄与する入力情報をサイバー空間で取得できます。ここにデータ科学的手法を取り入れることで、ナビゲーションを設計する外的・内的要因を明らかにし、最終的には彼らのナビに関する方策関数、すなわち“コウモリ脳”へたどり着きたい、と考えています。また得られた知見の工学応用にも挑戦していきます。コウモリの階層ナビゲーションの包括的理解からその社会応用までを目指していきます。

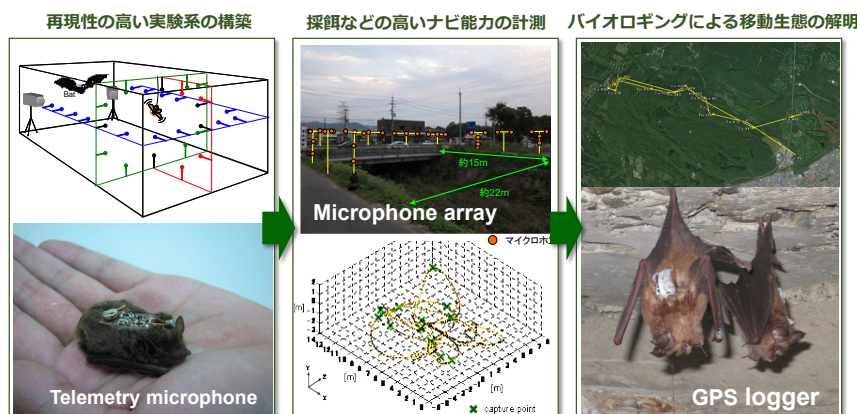


図1 実験室から野外計測まで、様々なスケールの階層ナビゲーションの解明を目指したコウモリのナビゲーション研究の構想。飼育下のコウモリを対象にした再現性の高い行動計測や、高いナビゲーションのパフォーマンスが観察できる野外での音響計測、さらにはバイオリギングを用いた野生コウモリの移動生態の解明など、幅広い手法を用いて取り組んでいきます。

計画研究 A01 フィジカル班:

場所細胞・格子細胞活動の計測と操作による階層ナビゲーションの機能解明



高橋 晋

同志社大学・大学院脳科学研究科・教授

脳内の海馬やその周辺部位では、ナビゲーションに深く関与する場所細胞が発見されており、それらの活動と動物行動の関係性から個体レベルのナビゲーションに関する神経科学的な知見が蓄積されています。しかし、ナビゲーションの上位にあたる個体間相互作用（インタラクション）や、階層性をもつ両者をまとめた階層ナビゲーションに関する神経メカニズムは未だ不明です。個体レベルのナビゲーションに関与する場所細胞などは、どのように階層ナビゲーションに寄与するのでしょうか？

この問いに答えることは、決して容易なことではありません。自然という過酷な条件下において、外的要因、運動能力、ナビ能力（目的地を認識する能力）、内的状態（空腹状態や神経活動）などを統合的に分析し、それらの因果関係を突き止める必要があるため、脳内あるいは環境への介入や操作が必要となります。

本提案領域では、計測工学、データ科学といった異分野に跨る研究者が有する装置や手法を結集し、動物の外的要因、運動能力、ナビ能力、内的状態を計測し、そこに介入する環境型Xログボットを開発します。加えて、数理モデルや深層学習モデルを活用することで、モデル化・シミュレーション体制を構築します。そして、介入とモデル化を繰り返すことで階層ナビゲーションの機能理解を目指します。

脳神経活動を屋外でも記録することができる無線計測装置である装着型Xログボットを活用することで、計画代表が専門とするモデル動物（ラット・マウス）だけではなく、他計画研究が専門とする野生動物（渡り鳥やサケ科魚類など）をも対象とします。モデル動物の脳内から発見された場所細胞などの活動が、自然界でも同じように機能するのか、それとも違いがあるのかを比較検討することにより、個体レベルから個体間相互作用を含めた階層ナビゲーションの神経メカニズムを解明するを目指していきます。



図 1. 研究構想
環境型Xログボットや装着型Xログボットの活用し、個体レベルから、それらが相互作用する集団レベルに及ぶ階層ナビゲーションの理解に取り組んでいきます。

計画研究 A01 フィジカル班:

アリコロニーの全個体識別長時間計測と組織ダイナミクスの系統的解析



西森 拓

明治大学・先端数理科学インスティテュート・特任教授

アリは、特定のリーダーがいなくても関わらず、高度で複雑な分業行動、協調行動をとおして、地球環境の変遷にも耐えうる安定した生産性を維持し、数千万年にわたって繁栄を謳歌してきました。

本研究計画班では、微細な RFID タグ/QR コードなどを利用してコロニー内の全てのアリの行動を個体識別しながら、数ヶ月にわたって長期間自動計測します。これによって、集団における労働分配・労働再編のダイナミクスを高精度で捉え、アリ社会の組織動態の新しい概念形成を目指します。また、次世代シーケンスをはじめとする網羅的オミックス解析の手法を取

り入れることで、アリの個体の内部状態(情報伝達物質や遺伝子発現状態など)と個体行動の相関も調べます。得られたデータを統計解析し、さらに数理モデルの構成・解析を行うことで、少数個体行動、大集団の組織行動まで、異なる階層における行動の駆動原理を結びつけ、生き物集団がうみだす、しなやかな組織形成・維持の根本機構に迫ります。計測系の開発や改良に関して A02 サイバー班、様々な動物の集団行動との共通点や相違点の検討に関して A01 フィジカル班の他の計画班と広く共同を進めていきます。

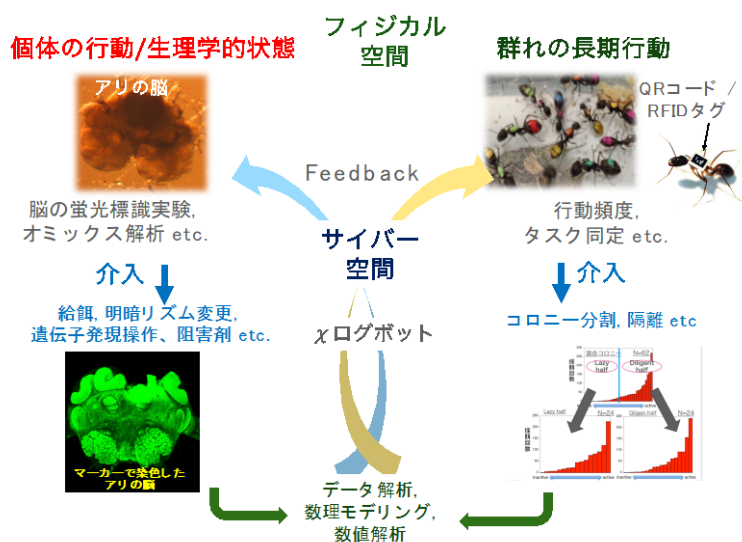


図1 超微細 RFID タグ/QR コードをアリに装着し、画像解析技術と組み合わせることで個体から集団に至るまでの行動の様子をデータ化します。並行して、遺伝子情報を基礎とした個体内部の分子発現状態もデータ化します。得られたデータの統計的解析と数理モデリングや数値解析を通じて、アリの組織ダイナミクスの基本ロジックを見出すとともに、ロジックの効率的探索のための積極的介入(コロニー分割や、明暗リズムの変更など)を実行し、アリ社会におけるマクロ(コロニー)からミクロ(個体)までの諸階層をつなぐ行動ダイアグラムの構成を目指します。

計画研究 A02 サイバー班:

χ ログロボット開発とスパースモデリングによる行動ダイアグラムの解明

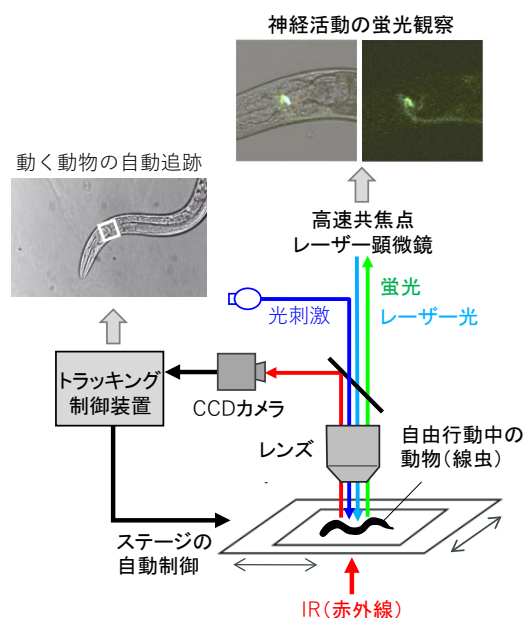


橋本 浩一

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

行動ダイアグラムを解析するためには行動の目的を推定する必要があります。数学的には、観測された行動が解として導出されるような、最適化評価関数を推定する逆問題となります。行動には環境との相互作用やその個体の内部状態が関連しているはずですが、すべての原因を計測することは容易ではありません。少ないデータ数から適切な関連性を求めるスパースモデリングが有効であり、最適化パラメータを未知量としてデータから推定する逆問題は、組合せ最適化として定式化できます。一般に、評価関数を推定しながら厳密解を求めるためには、大量のパラメータ数に対して指数的な回数の繰り返し計算を要します。一方、自然現象のイジングモデルを用いた量子アニーリング計算を用いれば、高速にスパースな（行動決定要因を本質的かつミニマムな数の構成要素で表す）近似解が求まるはずですが、本研究では、スパースモデリングにより行動ダイアグラムの推定問題定式化と高速な求解を目標とします。 χ ログロボットの開発においては、インタラクティブなプロジェクションマッピングを開発し、行動解析と介入のリアルタイム化にも取り組みま

す。また行動モデリングや、ロボット顕微鏡の共同開発、刺激介入の精密な解析を実施してきました。行動ダイアグラムの構造を可視化する基盤技術を開発し、さらに、ロボティクス・制御工学・行動ダイアグラム解析に基づいて、オンボード解析と介入を可能とする χ ログロボットハードウェアの設計・試作・開発、さらに χ ログロボットソフトウェア開発を実施します。



計画研究 A02 サイバー班:

自律的に計測・介入を行うXログボットの アルゴリズム開発



前川 卓也

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

GPSや小型慣性センサなどの計測技術の進展により、動物や人間、車などの移動体の軌跡といった移動情報の計測が容易となってきました。それに伴い、得られた移動情報から知識発見を行う研究分野が勃興してきました。我々の研究グループでは、生物のナビゲーション能力の解明を目指し、最新の情報技術を用いた計測・分析技術を開発してきました。例えば、野生動物に装着する世界初の人工知能搭載ロギングデバイスであるXログボットや、説明可能な深層学習を用いた動物軌跡情報の比較分析プラットフォームを開発しました。

これまでに我々の研究グループが開発した研究手法を含む一般的な研究手法は、生態や神経研究でのPhysical空間（実世界の空間）におけるデータ計測の取り組みと、情報研究でのCyber空間（計算機上の仮想空間）におけるデータのモデル化・分析の取り組みが分離していました。例えば、動物の行動データを情報科学研究者が分析する際、生態学者・神経科学者によって事前に計測されたデータに対して行うのみであり、どのような行動を対象に分析（計測）するか、どのような刺激（介入）を与えるかなどは、生態学者・神経科学者による経験や勘に委ねられてきました。分析の結果、何らかの知見の手掛かりが得られた場合、それに基づいて条件を変更した長時間にわたる実験を行い、再度分析を行うことも多いです。

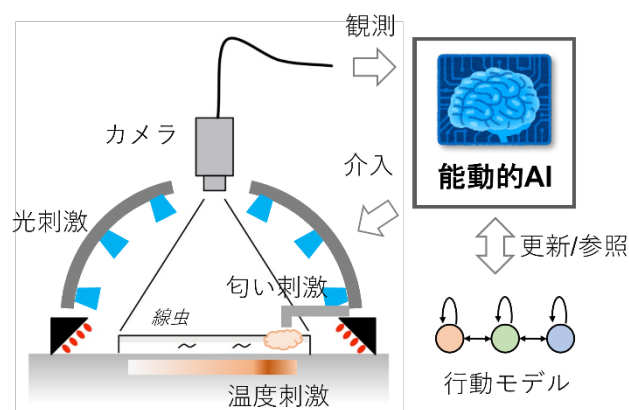


図 1. 線虫の行動モデルを自動解明する
環境設置型Xログボット

そこで本計画研究では、従来のPhysicalでのデータ取得とCyber空間での分析が断絶した研究手法を変革する、新しい枠組みの研究手法を実現することを目指します。特に、PhysicalとCyber空間の取り組みをシームレスに繋ぐ手段として、能動的に行動するAIの可能性を探求します。

例えば図1に示すように、動物の行動モデルの解明に繋がるような計測・介入方策を自動的に学習し実行するようなAIおよび装置(Xログボット)を実現します。AIは、新しい行動状態や新しい状態間の遷移ルールを発見すべく自動で計測・介入を繰り返します。さらに、野生環境において自動介入と観測を行う装着型Xログボットを開発し、A01 フィジカル班らとともに共同実験を行います。

計画研究 A02 サイバー班:

階層ナビゲーションのための数理・学習ベース 解析手法と介入方策決定技術



藤井 慶輔

名古屋大学・大学院情報学研究科・准教授

計測技術の発展によって様々な生物や人工物の集団移動の記録が可能になり、様々な社会や科学技術への貢献が期待されています。学術的にも、野生動物の行動データから生態の理解、人々の移動データから疫病の感染の理解等、複雑な挙動を示す集団運動の理解は、生物学や物理学等の多くの分野で重要な問題です。伝統的な生物集団の研究においては、各分野・生物種の理論に基づいて計測データから仮説検証を行う研究が多く行われています。また、生物種に応じたルールに基づく数理モデルの研究も多く、様々なモデルが提案されています。しかし、実測される生物の集団移動は支配原理が厳密には不明な部分があり（例えば個性や高次の社会的相互作用など）、実測の集団移動系列からその相互作用やパラメータを学習する学習ベースのモデル化も必要であると私たちは考えました。

近年発達を見せている人工知能の基盤である機械学習技術については、画像や音声などの領域においては、様々なデータの分類や未来予測を実現しているもの、より高度な相互作用を伴う集団生物移動では未解明な点が多く残されています。これは主に2つの理由があります。1つは生物自身が、物理・生物学的法則などの原理と、経験的に得られた知識の両方に基づき行動するため、モデル化が困難な点にあります。もう1つは、生物の新奇な行動など、その領域で本当に興味のあるシーンは希少であることが多く、少ないサンプル数でも適切にモデル化して予測する必要がある点です。

そこで本計画研究では、階層ナビゲーション研究のための（1）数理・学習ベース解析手法と（2）介入方法決定技術について研究を行います。（1）では、ヒトやカニ、トンボなどの個体間相互作用における行動ダイアグラム解明のための数理（ルール）・学習ベースモデルを融合した解析手法を開発します。さらに新たな仮説や行動パターンを、行動データマイニングにより発見します。また（2）ではデータから因果推論を行い、実験コストのため限られたデータを用いて介入の効果を検証します。さらに報酬を所望の行動に設定した強化学習により、介入方策を自動的に決定する方法を開発します。A01 フィジカル班、A02 サイバー班と連携してこれらを実現することにより、パラメータや規則の数が多い階層ナビゲーションの原理について、検証・解明することが期待できます。

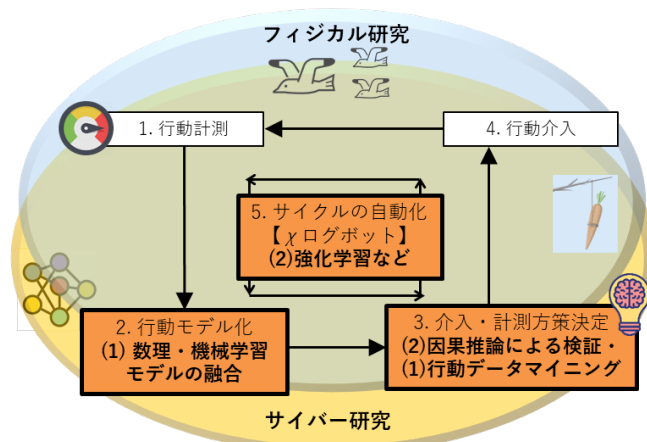


図 1. 領域全体に対する本研究の位置づけ (橙)。

計画研究 A02 サイバー班:

遠隔触覚刺激・二次元通信を用いた行動介入 基盤の開発と行動予測に基づく動作解析



牧野 泰才

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

動物の行動理解のために、本計画班では「対象とする動物が刺激の前に介入に気づかない刺激」という点に着目しました。それを実現するためのキーとなるのが、遠隔触覚刺激と二次元通信という2つの基盤技術です。

遠隔触覚刺激とは、複数の超音波素子を使い、特定の位置に強い音場を生成し力を提示する装置を利用するものです。この装置は、これまで主に、人に対して非接触で触覚を提示する手法として利用されてきました。遠隔で力を提示できるため、高速移動する卓球の球の軌道を制御できることなども確認されています。これを応用し、特に小動物に対して見えない介入を行うというのが、本計画班の課題の一つです。

超音波により見えない刺激を実現できるため、刺激がカメラの観察の邪魔にならないという利点があります。計画班内ではショウジョウバエ幼虫の行動計測に利用することを目標に研究を開始しています。一方、多様な種類の動物への応用のために、領域内での共同研究を積極的に進められればと思っています。

2つめの基盤技術である二次元通信は、二次元面内で高速な信号の送受信や電力供給を可能にする技術です。動物の行動計測のためのRFIDタグの読み取りや、装着型ロボットへの無線給電の必要性など、動物行動計測では高周波技術が要求される部分が多くありま

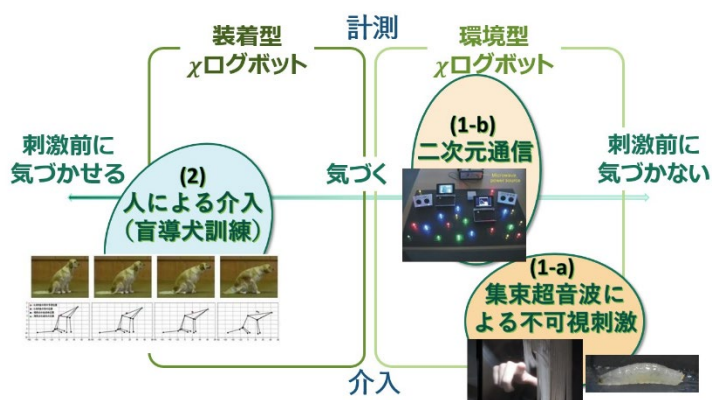


図 1. 動物に気づかせない介入と気づかせる介入によるアプローチ

す。本計画班では、二次元通信を基盤とし、行動計測・介入時の信号伝送や電力供給により適した環境型xロボットの開発を目指しています。

これら気づかせないアプローチとは逆に、人による「動物行動への意図的な介入とその理解」も視野に入れ、特に盲導犬訓練を対象に研究をすすめる予定です。盲導犬訓練は、訓練士が犬の状態を確認しながら適切なタイミングでコマンドを出し、意図する動作を誘導します。機械学習技術を用いて、犬の行動介入に適した状況を人がどう判断しているかを解明することで、他の動物の介入実験へと繋げることを目指します。

計画研究 A02 サイバー班:

データ駆動型 SWARM-MACHINE インタラクション技術の創出



川嶋 宏彰

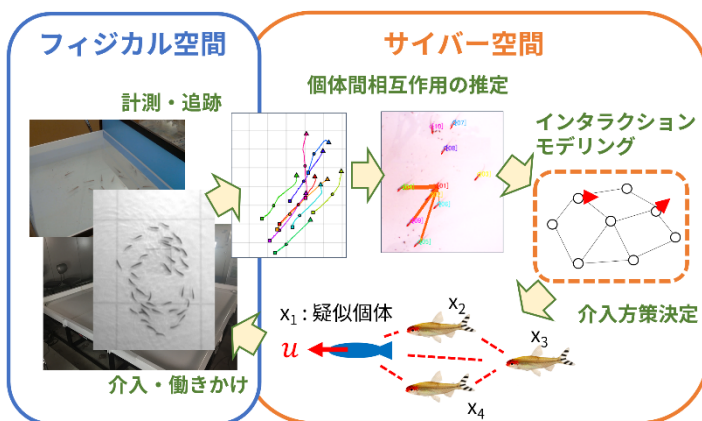
兵庫県立大学・情報科学研究科・教授

魚類などの生物群では、個体同士が相互作用（インタラクション）を行うことで、群れとしての複雑な振る舞いが現れます。では、群れ内部のどのような構造が、群れの特徴的な行動を支えているのでしょうか。本研究では、受動的な観測だけでなく、群れへの能動的な介入が、群れのメカニズムや社会構造などの解明・モデル化につながると考えます。そこで、フィジカル空間における計測と介入、およびサイバー空間におけるモデリングや介入方策決定を密に結合させたフィードバック・サイクル（図1）を設計します。この枠組みを発展させることで、人工システムを通じて群れへ介入しナビゲーションを行う Swarm-Machine インタラクション技術の創出を目指します。

まず、(1) 生物の行動ダイアグラムに関する知見／制約条件等を柔軟に組み込みつつ、説明・解釈可能性の高い個体間相互作用モデルを獲得するモデリング技術を、A02 サイバー班とも連携しながら開発します。計画班内では魚類（カラシン、アユ、マグロ等）を主な対象としますが、A01 フィジカル班の多様な生物種によりモデリング技術の汎用性を検証します。

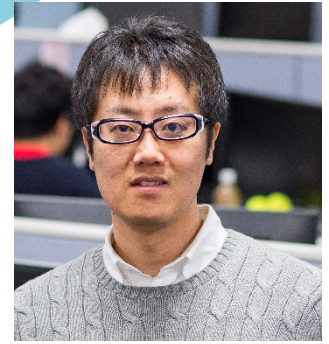
さらに、(2) 視覚優位な魚種の群れを主な対象として、映像や魚型ロボットなどの疑似個体により介入を行う実験プラットフォーム（環境型Xログロボット）を開発します。モデルによる予測や強化学習等を利用して疑似個体の介入方法を決定し、介入に対する群れの反応に基づいて、モデルを精緻化する枠組みを構築します。群れの理解から養殖や栽培漁業などの社会応用まで、様々な応用可能性を探ります。

図1 Swarm-Machine Interaction: フィジカル空間の水槽内で計測された魚群の映像や軌跡データを用いて、サイバー空間で個体間相互作用の推定や群れのモデリングを行い、疑似個体をどのように動かし群れへ介入するかを決めます。この介入方策に基づいてフィジカル空間の魚群へ実際に働きかけを行うことで、魚群の誘導などを行うとともに、予測と実個体群の反応とのずれを検出し、サイバー空間でモデルを更新します。本枠組みではこのサイクルを繰り返します。



研究成果紹介:

異なる動物種に共通する行動特徴の発見を支援する人工知能技術



前川 卓也

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

成果の概要

本研究では、異なる動物種に共通する行動特徴の発見を支援する人工知能技術を開発しました。本研究で開発した技術により、進化系統的に大きくかけ離れたヒト、マウス、昆虫、線虫のそれぞれドーパミンが欠乏した個体に共通して現れる行動特徴の発見に繋がりました。具体的には、ドーパミンが欠乏すると、速い速度を保って移動できない、加速するとき速度が安定しない、曲がる際に速度を落とせない等の運動障害

が、ヒトや線虫といった異なる動物に共通して現れることが明らかになりました。

動物種が異なると体長も大きく異なるため、それらの移動行動データを直接比較して分析することは困難でした。開発した手法により、パーキンソン病などの運動障害を伴う病気の治療法を開発するにあたって、ヒトに比べて実験が容易な動物を用いて治療法の効果を確認することができるようになると期待されます。また本研究結果により、ドーパミン欠乏に起因する病気に関わる遺伝子群が、進化史の非常に古い段階に、その起源を持つ可能性を示唆できました。

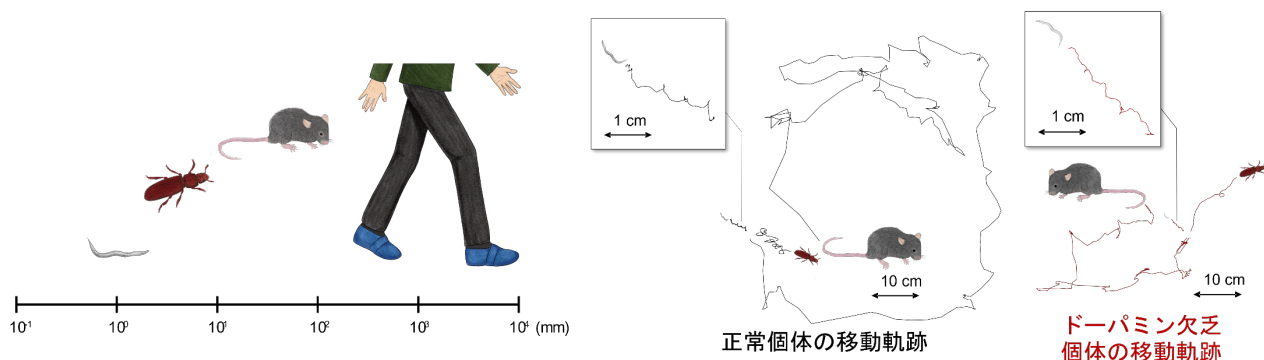


図 1：異なる種は体長も大きく異なり、その移動軌跡のスケールも大きく異なる。

研究の背景

運動障害を伴う病気の分析は、介入実験が困難な人間の代わりに実験用のモデル動物を用いて行われてきました。しかし、図1に示すように人間と動物では体長が大きく異なり、得られる行動データのスケールも大きく異なるため、それらの行動データを比較して解析することは困難でした。そのため、病気の治療法を動物に適用したとしても、こういった運動障害が解消されれば、その治療法が有効なのか分かりません。

提案手法

我々の研究グループでは、異なる種の正常および病気の個体の移動行動データから、種に依存しない病気の個体の行動特徴を抽出する人工知能技術を考案しました。提案したニューラルネットワークは、入力を個体から得られた移動軌跡とし、その軌跡が得られた個体の種と病気の有無を同時に推定します。このとき、種の推定精度が低くなり、病気の有無の推定精度が高くなるようニューラルネットワークを学習します。これにより、ニューラルネットワークが学習する移動軌跡の特徴は、種の判別が付かないが、病気の有無は判別できるような特徴となります。このような種の判別が不可能な特徴（どの種でも同じように現れる特徴）は、種に依存せずに現れる病気の特徴であると言えます。

本研究では、内部構造がブラックボックスとされるニューラルネットワークが学習した移動特徴を、生物学者が理解できるようにするため、アテンション機構と呼ばれる機構をニューラルネットワークに組み込みました。これにより、ニューラルネット

ワークが移動軌跡のどの箇所に注目して分類を行ったかを可視化することができ、ニューラルネットワークが学習した種に非依存な移動特徴の理解に役立ちます。

実験

ドーパミンが欠乏した動物（パーキンソン病の人とマウス、ドーパミンの受容体が欠損した線虫、ドーパミンの発現が少ない系統のコクヌストモドキ）の行動データと、正常な動物の行動データを用いて、ドーパミン欠乏個体に種横断的に見られる特徴の分析を行いました。その結果、ドーパミンが欠乏したヒト、マウス、線虫には、速い速度を保持して移動できない（図2）、加速するときに速度が安定しないといった運動障害が共通して見られました。また、ドーパミンが欠乏したマウス、線虫、昆虫には、曲がる前にスムーズに速度を落とせないといった運動障害が共通して見られました。

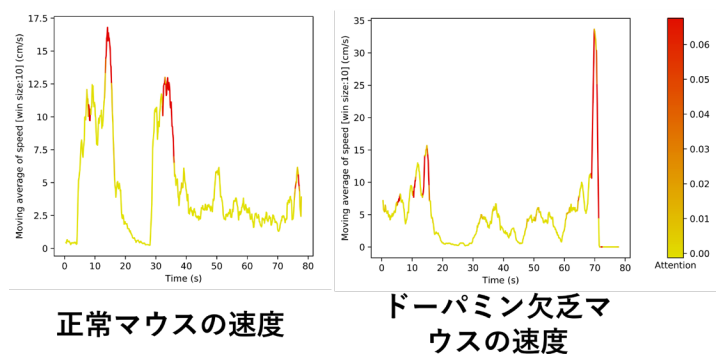


図2：正常なマウスとドーパミン欠乏マウスの速度の比較。ニューラルネットワークが注目している箇所が赤色で示されている。注目箇所は病気の有無の判断に有用とニューラルネットワークが判断している箇所に相当する。ドーパミン欠乏マウスの速度が短時間だけ増加しているところに注目していることが分かる。

成果の意義

本研究成果により、運動障害を伴う病気の治療法を開発するにあたって、人に比べて実験が容易な動物を用いて治療法の効果を確かめられるようになることが示唆されました。また分析の結果、ドーパミン欠乏が運動に及ぼすメカニズムが、線虫から人間まで進化的に保存されている可能性が示唆されました。

論文情報

Takuya Maekawa*, Daiki Higashide, Takahiro Hara, Kentarou Matsumura, Kaoru Ide, Takahisa Miyatake, Koutarou D. Kimura, and Susumu Takahashi: Cross-species behavior analysis with attention-based domain-adversarial deep neural networks, Nature Communications 12 (5519), (Sep. 2021).

研究成果紹介:

生物集団の軌跡から相互作用の規則を学習—「誰を見てどう動いたか」を理論とデータから推定できる技術を開発



藤井 慶輔

名古屋大学・大学院情報学研究科・准教授

生物集団の移動軌跡から個体間の相互作用の規則を明らかにすること、例えば動物、人間などが、「どのように周りを見て行動を選択しているか」をデータから推定することは、様々な科学分野での課題です。これまで動物や人間の集団行動を方程式でモデル化する際には、どのような対象でも当てはまる一般的な方程式を考えるか、種ごとに詳細な方程式を考えるのが基本的なアプローチでした。しかし前者は計測データからその妥当性を検証することが難しく、後者は問題を種ごとに考える必要があるため、図1に示すような

多種多様な生物集団の移動データから、一般的な相互作用に関する情報を、簡便に抽出することが難しいという問題がありました。一方、近年では機械学習技術の発達により、計測された生物の移動軌跡に基づいてモデル化し、予測や分類を行うことが可能になってきました。しかし、これらのモデルは必ずしも生物の研究者が考えた方程式には従っておらず、しばしば解釈が難しい場合があります。そこで本研究では、図2に示すように、動物行動学の抽象的な方程式のモデル [Nathan et al. 2008] に基づき、残りの不明な関数や変数を、計測データから機械学習を用いて推定することで、理論とデータの両方に基づいて「誰を見てどう動いたか」に関する情報を取得可能にしました。

方法の概要

方法論的には、グレンジャー因果を推定するための予測モデルである、ベクトル自己回帰モデルの係数を、図2のように移動軌跡の生成過程の構造を導入して深層学習により推定することで、非線形な移動軌跡を表現しつつグレンジャー因果の解釈性を落とさな

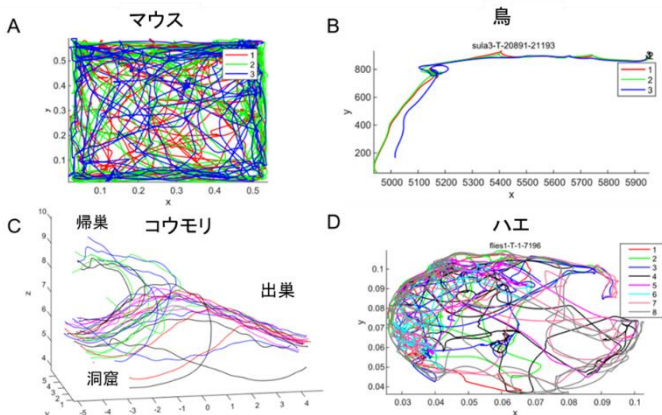


図1 各動物データセットにおける軌跡の例

い方法を実現しました。さらに「何も相互作用がなければ直線的に進む」のような人間の直観（あるいは物理法則）を活用し、その直観に反した場合に、罰則を掛けて学習する方法を用いることで、正確に「誰を見てどう動いたか」を推定可能にしました。

動物行動学の方程式のモデル(概念的)

$$p_{t+1} = f_U(f_M(\Omega, f_N(\Phi, r_t, w_t, p_t), r_t, w_t, p_t))$$



[Nathan et al. PNAS, 2008]

深層学習を用いて関数を推定

$$x_t^i = \sum_{k=1}^K \left(F_N^{i,t,k}(h_{t-k}^i) \odot F_M^{i,t,k}(h_{t-k}^i) \right) h_{t-k}^i$$

誰が原因でどちらに動くか解釈可能

図2 本手法の概要。動物行動学の概念的な方程式のモデルにおける関数（特に、ここではナビゲーションや運動の関数を表す f_N と f_M ）を、深層学習を用いて軌跡のデータから推定することにより、誰が原因でどちらに動くか、ということを解釈可能にした。

シミュレーションデータで検証

実際の動物から正解となる「誰を見てどう動いたか」を得ることは難しいため、人工的な鳥や魚の群れの研究で有名なボイドモデルを用いて、正確に推定できたことを確かめました（図3）。

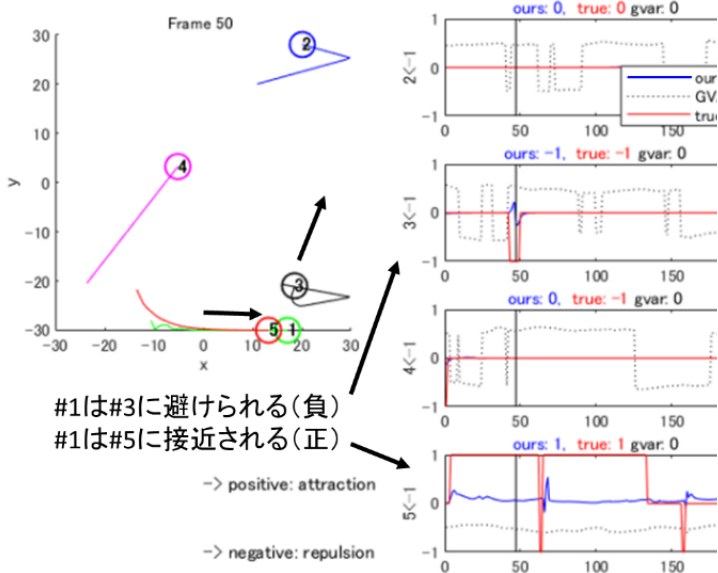


図3 ボイドモデルシミュレーションに対する結果の例。左：5つのボイドの動きの例であり、軌跡は動きの履歴を示す。特に、ボイド1は3に避けられていて、ボイド5に接近されている点に着目してほしい。右：原因（ボイド1）と結果（他のボイド2-5）の関係について、本手法（ours,青）と先行研究の方法（gvar,黒の破線）、および正解の値（true,赤）の結果を示す。1、0、および-1の3値で表された関係は、時系列グラフの上部に記述されており、それぞれ、接近、相互作用なし、および回避を示す。例えばボイド1は5に接近されているため正解は1であり、ボイド1は3に避けられているため正解（true）は-1で、ボイド2は1に無関心のため正解は0であるが、それらを本手法は正確に当てられている。ただし、本手法や先行研究の手法の時系列グラフの値自体は、それらの最大値で正規化されており、値自体を比較することはできない。

マウスとハエの分析結果

実際の生物集団の移動軌跡を用いた検証では、マウスやハエの集団移動データから、生物学的に統制された実験環境から得られた知見に基づいた仮説を、自由に行動する環境下においても定量的に検証できることを示しました（図4）。

マウスの実験（図1A）では、異なるケージで育てられた場合、他者はより社会的に新奇であり、したがって同じケージで育てられるより頻繁に、接近・回避が観察されるという仮説を立てました（図4Aにより支持されました）。これらはより統制された実験設定

（Nadlerら, 2004）や複数個体間の距離に基づく定量化（Thanosら, 2017）では示されていましたが、回避を含む時間的な行動の変化によって定量化されていませんでした。ハエの実験（図1D）では、オスはメスを積極的に追いかけるが、他のオスを追いかけない、という実験的研究結果（例：DemirとDickson, 2005）に基づき、より自然に近い複数のハエの自由な行動において、接近・回避の時間的な変化を定量化しました。その際、オス・メスの混合グループではオスのみのグループより頻繁に接近・回避が観察されると

いう仮説を立てました（図 4B により支持されました）。

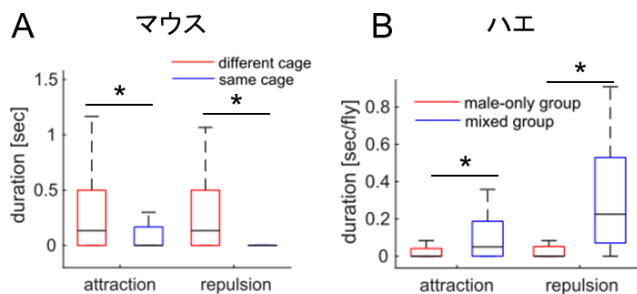


図 4 マウスとハエの分析結果。アスタリスクは、グループ間の統計的に有意な差を意味する ($p < 0.05$)。 (A) 異なるケージ (赤) と同じケージ (青) で育てた 3 匹のマウスデータの分析結果。縦軸は、3 回のインタラクションを 10 秒ビンで行った際の、両者の接近 (attraction) と回避 (repulsion) の時間 [sec] を示している。本手法では、仮説通り、接近・回避の両方で、異なるケージで育てた個体の方が、同じケージで育てた個体よりも有意に相互作用の頻度が多いことを示した。 (B) 4 匹のオスとメスの合計 8 匹の混合ハエ集団 (赤) と 8 匹のオスのハエ集団 (青) の分析結果。オスの相互作用の変化を比較するため、縦軸は各オスのハエごとに自分以外の 7 匹の相互作用を 10 秒単位で行った際の、両者の接近・回避を示した時間 [sec/fly] を示す。本手法では、仮説通り、接近・回避の両方で、オスとメスの混合集団におけるオスのハエの方が、オスだけのハエ集団の個体よりも有意に相互作用の頻度が多いことを示した。

コウモリとカツオドリの分析結果

さらに野外で計測されたコウモリやカツオドリの集団飛行データからは、これまで定量的に示されなかったコウモリのリーダー・フォロワーの関係やカツオドリの相互作用に関する知見を明らかにすることができました（図 5）。

コウモリの分析では、洞窟を出た（一部は出て戻ってきた）コウモリ集団飛行の 3 次元軌跡に本手法を適用しました（27 個体の例は図 1C）。動物集団の移動を対象とした研究では、リーダーとフォロワーの関係が調査されていますが、野生のコウモリについては不明でした。本手法の分析結果、洞窟を出たグループ

と戻ってきたグループの全 34 個体の中の興味のある 138 回の相互作用のうち（図 5A）、位置的に先頭のコウモリが同じ方向の後続のコウモリを回避した回数が 46 回、先頭のコウモリが後続のコウモリに接近した回数が 27 回、相互作用がなかった回数が 65 回でした（後続のコウモリの結果は明らかなので割愛しました）。コウモリは約 20m の範囲まで全方向の他のコウモリを反響定位できるので、位置的に先行しているコウモリは、同じ方向に位置的に後続しているコウモリから反響を受けることができます。この結果は、飛翔するコウモリの集団が単純なリーダーとフォロワーの関係を示さないことを示唆しています。

カツオドリの分析では、若い個体間の集団飛行中における相互作用の縦断的（長期的）な研究が十分に行われていなかったため、本手法の適用により定量的に調査しました（一例は図 1B）。ここではその一例として、3 羽のカツオドリの幼鳥の飛行時における GPS の軌跡を、34 日間のうち 6 回（各日約 12 時間）にわたって記録したデータを用いました。2、3 羽で相互作用があると考えられる軌跡に切り取って分析した結果（図 5B）、最初の測定日には、ID1 と 2 の間で最も頻繁に有向性相互作用が観察されました。一方、2 回目以降の測定では、測定日ごとに最も相互作用の頻度が多い個体に変化していることが確認されました。相互作用の頻度（特に回避）が少なくなった要因としては、同じ個体との付き合いに慣れたことが考えられます。

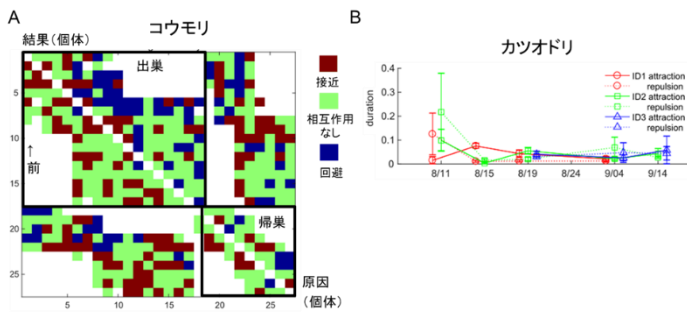


図 5 コウモリとカツオドリ分析結果。(A) 27羽のコウモリを分析した結果。横軸と縦軸はそれぞれ、本手法で推定したグレンジャー因果における原因 (cause) と結果 (effect) のコウモリを示す。この縦軸と横軸は、洞窟を出た (leave a cave)、または戻った (return) 順に分けて並べた。色は、グレンジャー因果の符号付き最大値を閾値で分類したものであり、赤、緑、青は、それぞれ、接近、相互作用なし、回避を示す。(B) カツオドリの2羽または3羽を分析した結果。横軸は測定日を示す。3羽の若いカツオドリ (赤、緑、青) のGPS軌跡を分析した (プロットがないのは測定なしのため)。縦軸は、各カツオドリの正 (接近、実線) と負 (回避、点線) のグレンジャー因果が推定された時間を正規化した時間 (つまり、別の1羽または2羽の原因として働いた時間)。2羽または3羽が同時に飛行している区間のみ分析した。エラーバーはその分析区間の間の標準誤差を示す。

成果の意義

本研究は、これまで概念的であった動物行動学の理論モデルの関数や変数を、深層学習モデルにより推定す

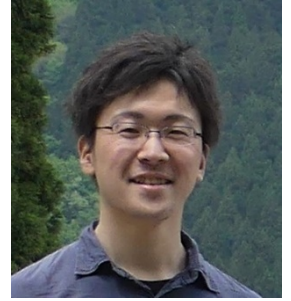
ることで、多種の生物集団に柔軟に適用できる定量的な解析方法を開発しました。これにより、人間を含む複数の生物種間の集団移動に関する普遍的な法則や、その多様性の発見へと繋げていくことが期待できます。さらに、本手法は大量のデータを必要とせず、解釈可能な深層学習手法を用いているため、その他の希少な生物集団の移動データや、人間や人工物などの集団移動データにも容易に適用でき、3体以上でも「誰を見てどう動いたか」をデータから推定することが可能です。これらは生物や人間集団の専門家や監督者が、対象の相互作用の意図を推定するのに有用だと考えられます。例えば生物実験の研究者や、スポーツチームのコーチが対象生物や選手の意図を推定して、実験の計画や戦術を考えることに利用することが期待できます。

論文情報

Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Kazushi Tsutsui, Emyo Fujjoka, Nozomi Nishiumi, Ryoya Tanaka, Mika Fukushima, Kaoru Ide, Hiroyoshi Kohno, Ken Yoda, Susumu Takahashi, Shizuko Hiryu, Yoshinobu Kawahara, Learning interaction rules from multi-animal trajectories via augmented behavioral models, *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS'21)*, 34, 2021

研究会報告:

キックオフシンポジウム報告



藤岡 慧明

大阪大学・情報科学研究科・特任研究員

令和3年12月8日(水)、本領域「階層的生物ナビ学」のキックオフシンポジウムが開催されました。このシンポジウムでは、同年にスタートを切った本領域の領域趣旨および計画研究の紹介が主に行われ、公募に関する説明等も行われました。昨今のコロナ禍のため、zoomによるオンライン形式でしたが、120名以上の参加が見られ、活発な議論が行われました。

計画研究の紹介はA01 フィジカル班とA02 サイバー班に分かれて行われました。実空間とサイバー空間を行き来するサイバーフィジカルは本領域のキーワードの一つです。シームレスCPS(Cyber Physical System)を用いて動物の行動ダイアグラムを解明しようとする本領域研究。計画研究発表全体を通して、多彩な分野を横断していた前領域「生物移動情報学」と比べて、生物ナビを明らかにするための枠組みがより洗練された印象を受けました。

また、別のキーワードとして、ほぼ全ての先生方が発表中に述べられていたのが「介入」です。これも前領域にはなかったユニークな点だと感じました。魚群の動きを“介入”してコントロールしたり、飛行中のウミネコに天敵の声で“介入”したりして、行動ダイアグ

ラムの解明を目指すというものです。この介入のためのキーデバイスとなるのが、前領域で開発されていたAI搭載型ロギングデバイスの進化系「χログロボット」です。AI搭載というだけで十分すごいのですが、AIが収集したデータから因果関係を分析・学習して介入を自律的に制御するという、とんでもない機能が備わることになります。これがうまく機能すれば、生物行動ダイアグラムの包括的な理解が期待されます。

このように、前領域を通して大きく強化・洗練された本領域「階層的生物ナビ学」。今後、どのように生物ナビゲーションの解明に迫っていくのか、今からとても楽しみです。

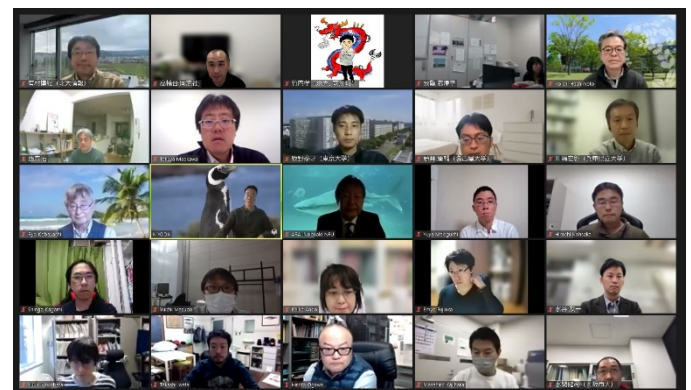


図1 キックオフシンポジウム(オンライン)の様子

若手向け企画報告:

勉強会(12/24)に参加しました



井上 湊太

名古屋大学・環境学研究科・学振 PD

2021年12月24日に開催された学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」、第1回領域勉強会の報告を行います。この勉強会では前川先生(大阪大学)が「ログボットの歴史と今後」と題し、これまでの自身が携わったバイロギングの歴史とログボットを用いた介入実験に関して紹介していただきました。

まず、ログボットの歴史編では、「研究者が注目している行動」の前後のみを記録するアルゴリズムに関するお話を聞きました。これは、効率よくデータをとるための方策の一つです。体重の重い動物なら大きなバッテリーを装着し、長期間データをとることも可能かもしれませんが、体重の軽い海鳥ではそうはいきません。「研究者が注目している行動」を検出し、その点に絞ってデータをとることができれば、無駄なデータを省略することができます。行動検出のアルゴリズムは私も非常に興味があるテーマでしたので、前のめりにお話を聞きました。海鳥の採餌行動の検出には、加速度データをもとに、決定木と呼ばれるアルゴリズムを用いておられました。こういった話は初学者がいきなり論文で勉強しようとする、なかなかハードルが

高いので、日本語で丁寧に説明していただけると非常にありがたいと感じました。

ログボットの今後編では、動物に装着した装置から、なんらかの介入を行うという話がメインでした。これまでのバイロギングでは、研究者が装置を通して動物の行動を変化させる試みはありませんでした。しかし、野外環境で刺激をコントロールすることができれば、研究の幅が広がります。今回の発表では、海鳥に捕食者の音声を聴かせる実験の様子が紹介されました。音声の再生と同時に、海鳥の行動が明らかに変わっていました(個人の感想です)。これは面白いぞと思うと同時に、他にどんなことに使えるだろうと考えたときに、私はあまり思いつきませんでした。どうやら他の聴衆の方も同様の感想を持たれたようでした。このあたりは、動物研究者側の課題だと思います。ログボットを使った介入実験における良いネタはなんだろうと考えると同時に、目の前にある不思議なことを先入観なしに見つけていきたいと改めて思いました。

弟子入り体験記:

A01 飛龍班からA02 藤井班へ



手嶋 優風

同志社大学大学院・生命医科学研究科・博士課程3年

このたび、学術変革領域研究「階層的生物ナビ学」の助成をいただき、2021年12月21日に私たちの研究室（飛龍班）から5人、名古屋大学情報学研究所の藤井慶輔准教授の研究室に伺いました。飛龍班では主にコウモリの行動計測を行っており、これまでコウモリの野外における集団飛行の飛行軌跡データを藤井先生にお渡しし、主に個体間の因果関係を検討していただいております。今回、その解析手法を学ぶため、またコウモリの飛行データからコウモリの行動判断をモデル化できないかという相談のため、対面での弟子入りさせていただきました。

その結果、既存コードの理解が進み、既存コードを私たちが持っているコウモリのデータに合わせて、私たち自身で修正することができるようになりました。私は、主にコウモリの行動の計測を行っていますが、同時に取得した行動データから、コウモリの判断のモデリングをこれから行っていきたいと考えており、非常によい機会となりました。

また対面であったことも大きな意味があったと感じています。その場で遠慮なく質問をどんどんすること

ができました。藤井先生を1日中拘束してしまったのは非常に申し訳なく思っておりますが、私たちの実力を鑑み優しく教えていただきました。コウモリの行動計測を行っている飛龍班にとって、複雑な解析手法のコードの把握というのは、最初の取っ掛かりでのハードルが高く、そこで挫折してしまうことが多いです。今回、藤井先生に弟子入りを受け入れていただき、そのハードルを何とか乗り越えることができたことは今後、研究を進める上で大きな一歩となりました。藤井先生には大変お世話になりました。この場を借りて、感謝を申し上げます。ありがとうございました。そしてこれからもよろしくお願いいたします。



図1 藤井先生に教えてもらいながら自分たちでプログラムのコードを書いている様子

階層的生物ナビ学

学術変革領域研究 (A)

「サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション」ニュースレター
Vol. 1 (2022年1月発行)

<領域代表>	橋本浩一	東北大学大学院 情報科学研究科
<編集/装丁>	西森拓	明治大学 先端数理科学インスティテュート
	飛龍志津子	同志社大学 生命医科学部

領域事務局：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学 大学院情報科学研究科

Tel: 022-795-7018 Email: contact@bio-navigation.jp

領域ホームページ：<https://bio-navigation.jp>



CyNav

Hierarchical Bio-Navigation
Integrating Cyber-Physical Space