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

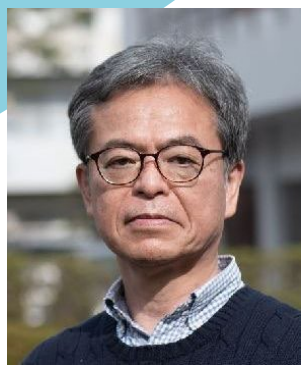
文部科学省　令和 3 年度
科学研究費助成事業　学術変革領域研究(A)
ニュースレター VOL.5
2024 年 4 月

目次

領域代表挨拶	p.1
公募研究（第２期）の紹介	p.3
研究成果紹介	p.23
勉強会参加報告	p.31
領域イベント報告	p.38
国際活動報告	p.42

4 年目を迎えて:

領域代表からのメッセージ



領域代表　橋本 浩一

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

令和 3 年（2021 年）「学術変革領域研究（A）」研究領域として【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（略称：階層的生物ナビ学）】が採択され、今年で 4 年目となりました。

まず、計画班の前川先生が「実世界を理解する人工知能の開発とその動物行動解析および行動異常発見への展開」という研究実績で、第 20 回日本学術振興会賞を受賞しました。前川班を中心として本領域で生み出した融合研究の成果が大きく認められた結果であり、領域としても非常に嬉しいニュースです。

この領域の計画班は A01 フィジカル班（依田、飛龍、髙橋、西森）と A02 サイバー班（橋本、前川、藤井、牧野、川嶋）で構成され、フィジカル班が研究対象とする動物行動を、サイバー班のもつデータサイエンス技術で解析し、動物のもつ階層的な行動ダイアグラムを解明することを目指して活動しています。

発足 4 年目の 4 月には新しい 2 期目の公募班 20 チームが加わりました。フィジカル研究の対象が広がり（クマ、ウマ、牧羊犬、イルカ、ペンギン、小鳥、ハエ、アユ、鱗食魚、アワビ、ホタテ、ゼブラフィッシュ・・・）、そして革新的な計測手法、介入手法、解析手法（VR、慣性センサー、風速計測バイオロギング、環境 DNA，異種エージェントなどなど）が取り入れられ、領域としての研究の厚みが増しました。行動ダイアグラム解明のためのチーム連携は計画班同士に留まらず、計画班と公募班とのさまざまな共同によってさらに新しい研究を仕込みにかかるところです。

領域の活動としては、2023 年 6 月に東北大学で領域会議を開催し、100 名を超える参加者を得て、計画班と公募班のコラボの成果で盛り上がりました。2023 年 10 月には第 66 回自動制御連合講演会（東北大学）にて「階層的生物ナビ学」と題した OS を開催し、領域より 5 件の発表を行いました。さらに 2024 年 3 月には国際シンポジウムを東京大学で開催し、海外からの招待講演者 3 名を含む 14 件の口頭発表と 41 件のポスター発表を計画班と公募班から行いました。総勢 80 名を超える領域関係者が一斉に集い、対面での会はやはり大いに盛り上がりました。懇親会では海外の招待講演者から本領域が推し進める融合研究に心強い応援のコメントもいただき、とても嬉しい機会になりました。またシンポジウムでは、2024 年 1 月に開催した領域主催のコンペティション「Fish Tracking Challenge 2024」の上位入賞者を招待した授賞式も同時に行いました。

領域で企画する毎月の勉強会（オンライン）も回を重ね、今年の 2 月で 23 回目となりました。毎回主旨を変えながら楽しく交流しています。

さまざまな生物のナビ、インタラクション、階層行動を、χログボット・行動ダイアグラム・シームレス CPS で解明することが本領域の目標です。すでにいろいろな対象に多様な手法が展開されています。計画班・公募班のメンバー全員に感謝します。

2024/3/11-12　階層的生物ナビ学　国際シンポジウム
International Symposium on Hierarchical Bio-Navigation
@東京大学

公募研究 A01 フィジカル班:

デジタルツインによって紐解く昆虫の環境適応的な行動選択過程の獲得

志垣　俊介

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教

昆虫は小規模な神経系でありながら、複数の感覚器から得られた情報に基づいて即座に周囲環境を認識し、適切に次の行動を決定できます。この適応性は環境の複雑さが変化したとしても維持されます。この適応的な制御器を人工的に再現できれば、小規模な計算コストでありながらも高い環境適応性を有したロボットシステムが創成できるはずです。この制御器をモデル化するためには、感覚入力に対する行動出力を同時にかつ精緻に取ることが重要です。

そこで、本研究では、デジタルツイン技術を基盤とした昆虫用仮想現実システムによって、多様な空間における感覚入力と行動出力の連関関係を網羅的に計測します（図 1）。本研究では、カイコガ雄成虫の性フェロモンによって励起される雌定位行動を対象に実験を進めるため、空気流を遮る障害物の形状や大きさによって変化する、匂い拡散や風の分布等をデジタル化し、仮想空間で再現します。デジタル化した多様な空間に昆虫を遭遇させ、感覚刺激と行動出力のデータセットを獲得します。得られた昆虫の入出力データは、AI 的解析手法を導入することで行動そのものではなく、どのような状態に価値を置いて行動しているかを調査します。これにより、生物が持つ能力を身体構造やサイズの異なるロボットへと適用可能な知見へと変換できることが期待できます。

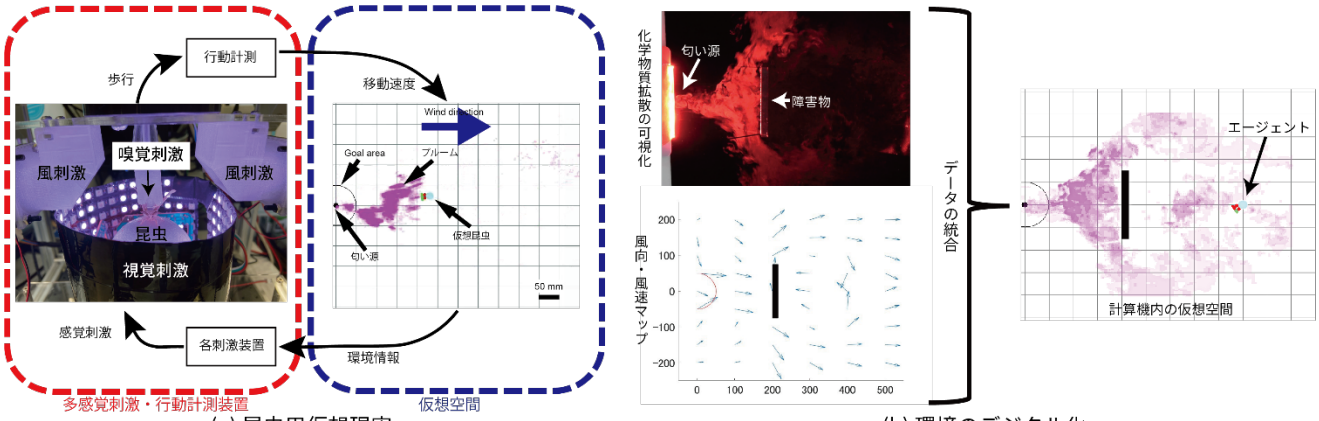


図１．研究構想．(a)本研究で用いる昆虫用仮想現実システムの概要図．
(b)実環境の匂い拡散等のデジタル化手順．

公募研究 A01 フィジカル班：

動物装着型測器によるペンギンと他の動物の獲物追跡戦術とその誘導方式の解明

河端 雄毅

長崎大学・水産学部・准教授

多くの動物は生活史の様々な段階で、獲物やその他の動物を追跡します。近年、この「追跡行動」において、どのような幾何学的なルールで追跡するか（追跡戦術：図 1）、そしてどのように自身をその経路に導くか（誘導方式）という研究が盛んに行われるようになりました。これらの情報は、「動く物体にどのように到達するか」という点で、動物行動学だけでなく、スポーツ科学、ロボット工学、漁具漁法学など様々な分野に役立つと考えられます。

様々な先行研究がありますが、ほとんどの研究は室内実験での固定カメラによる映像の撮影や、GPS を装着した捕食者に人工餌を追跡させるといった実験的なものです。広大な範囲を移動する野生動物において、獲物追跡行動を測定することは未だ困難だと言えます。そこで本研究では、高頻度で獲物を捕獲するペンギンをモデルとして、動物装着型のジャイロ・地磁気・加速度センサと広角カメラによって、獲物追跡戦術とその誘導方式を明らかにすることを目指します。ペンギンは群れで行動することで、より効率的に獲物を捕獲するとされるため、仲間の位置に応じて追跡経路がどう変化するかも分析する予定です。さらに領域内の研究者と、既存の AI 搭載測器（ログボット）を改良し、捕食シーンの記録が困難な動物（獲物の捕獲頻度が低い動物）の追跡行動を測定可能にしたいと考えています。

その他にも、餌を複数方向にランダムに逃避させる場合と同じ方向に逃避させ続ける場合を再現し、実際の捕食魚に追跡させる実験や、車の接近に対する野生動物の逃避経路の解析なども行っているため、これらの研究においても、本領域の方々と適宜共同研究を実施したいと考えています。

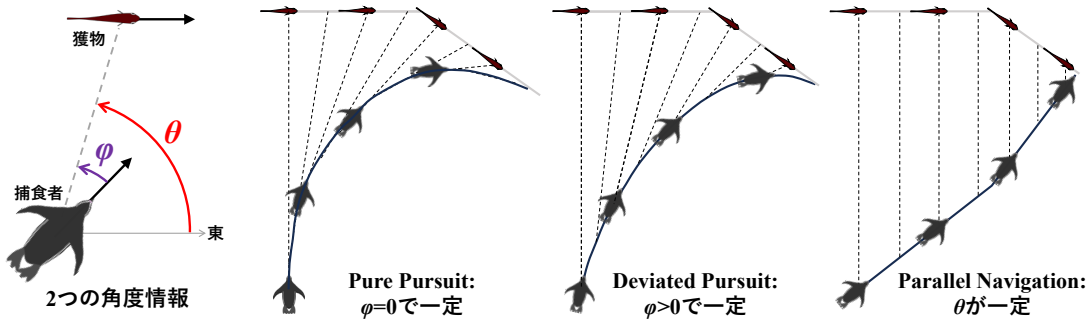


図１．異なる追跡戦術（幾何学的法則）の経路図

公募研究 A01 フィジカル班:

近縁種間において群れを作るか否かのスイッチングを制御する神経機構.

田中 良弥

名古屋大学・理学部・助教

動物の中には盛んに群れを形成する種もいれば、ほとんど群れを形成しない種もいます。こうした違いは、近縁な動物種間でもみられます。そのため、群れを作るか否かは、それぞれの動物種で生活史や生息環境に応じて柔軟にスイッチングされていると考えられます。群れの形成は個々の個体が他の個体を知覚して、ナビゲーション行動を示すことで生じます。また、そうしたナビゲーション行動の背景には他個体を感覚情報に基づいて認知して、その情報を処理する脳や神経の働きが存在すると考えられます。では、ナビゲーション行動やそれを制御する神経機能のどのような種間の違いが群れ形成の柔軟なスイッチングを生み出すのでしょうか？

本研究では、ショウジョウバエという体長 2-3mm の昆虫を用いてこの問いに迫ります。ショウジョウバエは私たちの身近にも多くの種が生息しており、食性も果物からキノコや植物など種ごとに多様化しています。私たちはこれまでに、ショウジョウバエ種間においても群れ形成するかどうかが切り替わっていることを見出しました。実験モデル種として遺伝子・神経回路の多彩な操作技術が整備されたキイロショウジョウバエとその近縁種を比較することで、群れ形成のスイッチングを生み出すメカニズムに迫ります（図１）。

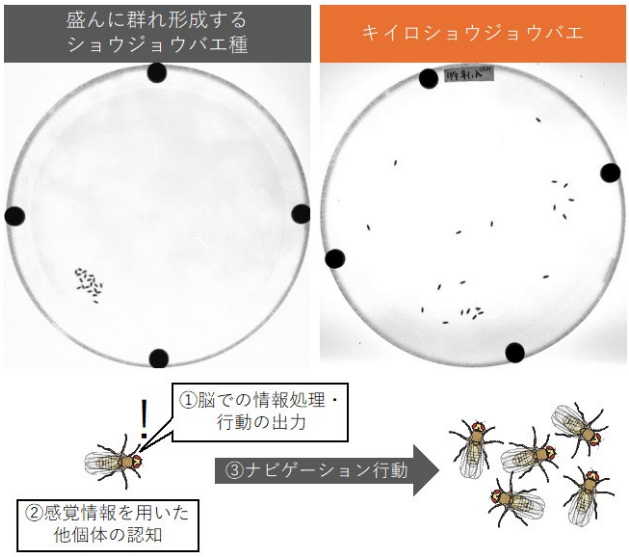


図１．ショウジョウバエの群れ形成の種間差と群れ形成に重要と考えられる３つの要素（①-③）。これら要素が種間でどのように異なるかを明らかにする。

公募研究 A01 フィジカル班：

大型陸上哺乳類の「渡り」にかかわる階層ナビゲーションのメカニズムの解明.

小池 伸介

東京農工大学大学院・教授

私たちは、Cyber Physical System（CPS）を用いることで、個体差を考慮して動物の行動を起因する要因とそれらの関係や、行動ダイアグラムを介した個体―個体群間の階層性の解明を目的としています。

具体的には、これまで取得してきた野生のツキノワグマとニホンジカの行動情報およびその周囲の環境情報から、行動を支配する因子とそれらの関係を明らかにします。具体的には突発的に発生する長距離の移動に注目します。ニホンジカは個体群の中に、秋(往路)と春(復路)に長距離移動を行う群れと、移動を行わない群れが存在する部分的（partial）な「渡り」を行う。また、ツキノワグマはドングリの凶作年の晩夏（往路）と晩秋（復路）に長距離移動する個体が存在する、部分的（partial）かつ条件付（facultative）の「渡り」を行うという、異なる特徴的な「渡り」特性を有します。さらに、両種とも広大な地域を生息場所とすることから、景観構造などの環境因子と移動との関係を理解するうえで最適な対象動物です。また、単独性のツキノワグマと群れ性のニホンジカという異なる特徴から、個体間の行動の同調性に対する他個体の影響の有無を考慮しつつ、個体レベルの移動ナビゲーションに与える環境の影響の評価が可能となります。これらの異なる特徴を有する２種を対象にすることで、個体間の行動を同期するトリガーとなる因子を把握することを目指します。

さらに、陸上大型哺乳類を対象とすることで、これまでは重量などが制限になり実現できなかった様々な革新的多機能デバイスの搭載が可能となり、新たな機材の開発にも、共同して臨みます。

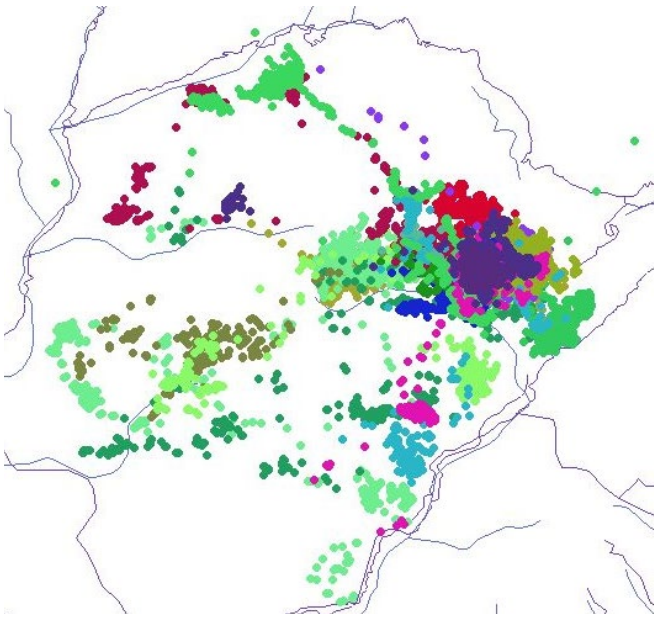


図１．ツキノワグマの夏から秋の行動。色の違いは個体の違いを表します。ドングリが凶作の年の秋には、クマは夏まで居た場所から大きく動くものの、秋の終わりには元の場所に戻ってくる。

公募研究 A01 フィジカル班：

小型魚類を用いた群れナビゲーションの階層ダイナミクスについての光解析.

津田　佐知子

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

群れ行動は、魚類をはじめ多くの動物種にみられるナビゲーション行動であり、また個体間相互作用などにもとづく社会性行動でもあります。しかし、この群れの階層性がどのように形成されるのか、その詳細には不明な点が多くあります。本研究では、小型魚類ゼブラフィッシュを用いて、群れ行動の階層性がどのように形成され、変化するのかを明らかにすることを目指します。そして、個体の内部状態（神経基盤）、また発達期の環境といった外的要因により、群れパターンが規定されるしくみを明らかにします。このために、独自の光操作解析システムを用いた、行動観察と神経活動イメージング、および、本領域内での連携を通した光・環境操作によるフィジカル空間での解析、さらにサイバー空間での時系列データのネットワーク解析、数理モデル化などをシームレスに実施します。特に、運動制御・学習、さらに社会性に重要な役割をもつことが知られる、小脳を中心とした広域神経ネットワークのダイナミクスに注目します。これにより、動物の群れにみられる階層的ナビゲーションの制御機構を包括的に明らかにします。また本研究を通して、発達環境に注目した集団性の改善、回遊生物の環境保全、漁業・群ロボットなどの社会応用への可能性も目指していきます。

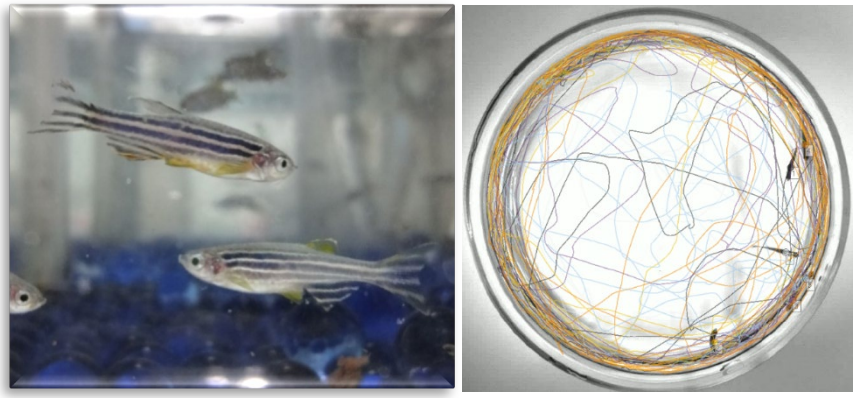


図１．ゼブラフィッシュ成魚（左）の集団がなす行動のトラッキング例（右）

公募研究 A01 フィジカル班：

ホタテガイの捕食回避機構における成長依存性の解明

三好　晃治

北海道立総合研究機構・中央水産試験場・主査

ホタテガイ（*Mizuhopecten yessoensis*）は、日本の重要な水産資源であり、特に北海道での漁獲量が全国の半分以上を占めています。通常、ホタテガイは一定期間を浮遊幼生として過ごした後、海底に着底します。その後は個々のホタテガイが単独で生活し、自由に泳ぎ回りながら捕食者から逃れることが一般的です。しかし最近、北海道の知床半島沿岸で、約 30 万個体が集まる大きな群れを形成し、捕食者から集団で逃れる行動が初めて観察されました。

この驚くべき発見に触発され、私たちはホタテガイがどのようにして集団を形成し、捕食者から逃れるのか、そのメカニズムを解明する研究を行っています。前回の公募研究では、殻長 70mm を超え、成熟可能なホタテガイが、捕食者であるヒトデから逃れるために、20 個体/㎡以上の密度で集団を形成し、数日間維持することが明らかになりました。一方、体長 30mm 程度の幼いホタテガイは、集団を形成するよりも、岩などの障害物に身を隠す行動が多く見られました。

本研究では、ホタテガイの成長段階ごとの捕食回避行動を詳細に検証することで、成長過程における捕食回避機構や個体間認知機能の進化を明らかにし、これがどのように生存戦略として機能するかを解明します。さらに、実際の海域でのホタテガイの成長段階別の分布パターン、捕食者の分布との関係性、周辺環境との相互作用を明らかにし、ホタテガイの生存戦略と個体群動態の関係を明らかにすることを目的としました。

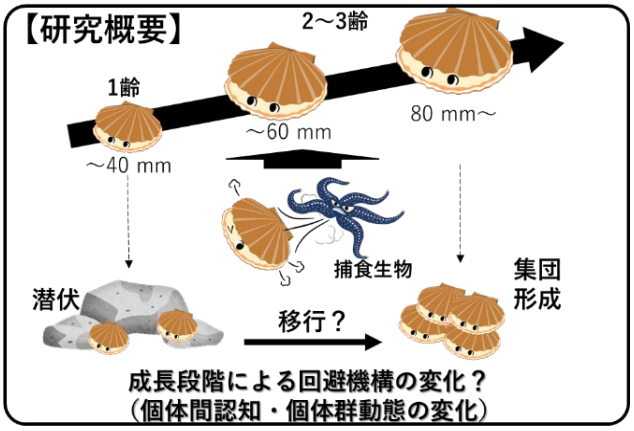


図１．本研究の概要

公募研究 A01 フィジカル班：

視覚と聴覚の協調によって実現される イルカの共同採餌行動

森阪 匡通

三重大学・大学院生物資源学研究科・教授

本研究は、海洋の高次捕食者であり、エコーロケーションと視覚を同時に用いるイルカの行う、群集性魚類の共同採餌を総合的に理解することを最終目標としています。捕食者・被食者双方の群れのナビゲーション・インターラクションが複雑に絡み合う現象を紐解くには、単純化したモデルから現象に沿うように複雑化していくボトムアップ型研究と、複雑な現象を複雑なまま捉え、現象の変動がどのような要因で起こるのかを読み解くことにより、その現象を要素に落とし込むトップダウン型の両軸からの研究が重要です。

本研究では、捕食者側の戦略を取り上げ、ボトムアップ型研究として、イルカが環境認識の際に用いる視覚と聴覚の協調についての飼育下での詳細な研究を行います。本領域研究第１期でプロトタイプを制作したトラッキングシステム（両目の後方に小型カメラ、噴気孔後方に音響データロガーを吸盤にて装着するシステム）を洗練させ、視覚とエコーロケーションをどのように使い分けながら採餌を行うのか、また他個体とのインターラクション、行動同期時の目と音の使用について調べます。一方、トップダウン型研究として野生下でのイルカの群集性魚類の共同採餌の個体レベルの行動やインターラクションの研究、魚種ごとの行動変化の研究を行います。本領域研究第１期でドローン映像と一眼レフカメラを同期させる方法を確立したため、これを用いて、誰が誰とどのように共同採餌を行い、どのようにタイミングを合わせているのかについて、様々な共同研究者とともに調べます。

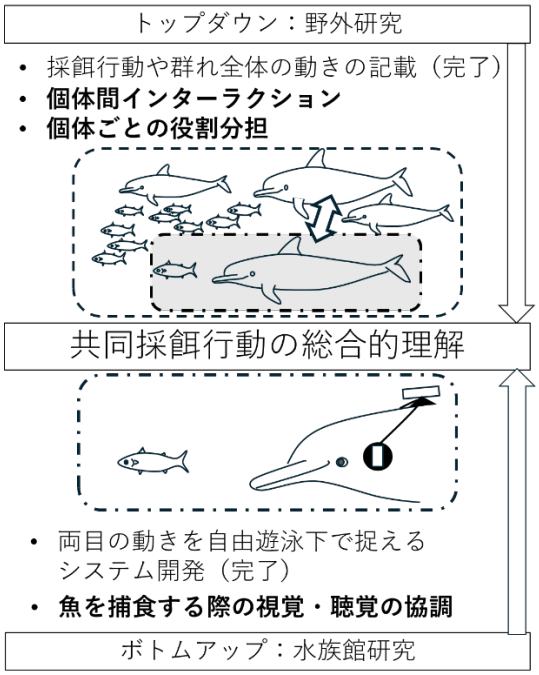


図１．イルカが共同採餌をどのように実現させているのかに迫るため，ドローンやカメラによる野生のイルカの観察と，飼育下のイルカの詳細な視覚聴覚の使い分けについての研究を行います．

公募研究 A01 フィジカル班：
環境 DNA を用いた放流アユの集団ナビゲーションの解明

宮園 誠二

山口大学・大学大学院創成科学研究科・准教授（特命）

国内において、水産有用種のアユの資源量は年々減少しています。例えば、広島県・島根県を流れる江の川ではアユの漁獲高が昭和 40 年代に比較して 1/50 に激減しています。アユは両側回遊魚であり、成長に応じて海域と河川を利用するため優れたナビゲーション能力をもつことが報告されています。しかし、国内の河川でアユの種苗放流が行われており、放流アユが優先している河川区間が数多くみられるのが現状です。また、放流アユは、卵から人の管理下で育てられているものも多く、実河川で目的地である産卵場に到達するためのナビゲーション能力や放流アユを取り巻く環境とのかかわり（インタラクション）が明らかとなっていません。そのため、河川におけるアユの適切な資源管理を行うためには、放流アユの河川内の移動と人を含む河川環境との関係を明らかにし、将来的な気候変動や人間活動のアユへの影響を推定することが極めて重要となります。しかし、流域スケールでアユの集団としての移動をモニタリングし、そのメカニズムを解明するには、多大な時間・労力がかかるため、従来の直接観察手法（網などによる採捕）では極めて困難です。近年、水中に含まれる生物由来の DNA 情報を検出する環境 DNA 分析が効率的なモニタリング手法として注目され、本手法によるアユの生息場・産卵場の評価の有効性が報告されています。アユの集団が季節的に流域内を移動することにより流域内のアユの生息密度が変化し、それに応じてアユの環境 DNA 濃度（copies/L）も顕著に変化することが予測されます。そこで本研究は、放流アユの環境 DNA 濃度の時空間変化をモニタリングすることで放流アユの移動パターンを把握し、環境要因（河川水温、河川の分断化等）との関係をモデル化することで、放流アユの成長期初期から産卵期終了までの集団移動パターンにどのような環境要因が影響し得るか明らかにすることを目的としています。

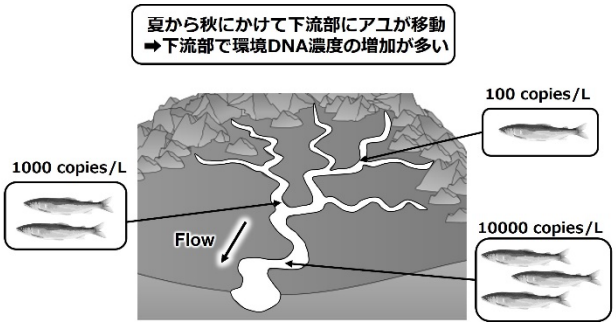


図１．アユの環境 DNA 濃度の季節変化

公募研究 A01 フィジカル班：

磁気コンパス複合体の構造機能解析による地磁気依存的ナビゲーション機構の解明

金 穂香（Kim, Suhyang）

東京大学・日本学術振興会特別研究員 PD

渡り鳥をはじめ、季節に応じて長距離を移動する動物たちは、地図を持たずとも自身の位置情報を正確に把握することができると考えられています。さらにこのような驚くべき高度な航行能力には、地球の磁気（地磁気）を感知する能力である、「磁覚」が関わっていると言われています。渡り鳥をはじめとした動物たちは、地磁気を感知した後、その情報を脳へと伝えることで位置情報を得ていると考えられますが、このような磁覚が発動するメカニズムは、未だ多くの謎に包まれています。本研究では、磁気を感知し、その情報を脳へと伝える機能を担うタンパク質複合体、磁気コンパス複合体の実態に迫ることを目指します。磁気コンパス複合体に対してクライオ電子顕微鏡法を適用し、磁気コンパス複合体の立体構造を原子分解能で明らかにします。さらに磁気コンパス複合体について各種生化学アッセイによる機能解析を行い、その結果を構造情報と組み合わせることで、動物が持つ磁覚が発動するメカニズムについて、分子レベルで明らかにします。

本研究を「階層的生物ナビ学」領域にて展開するにあたり、磁覚が発動する分子メカニズムの解明という形で、領域の目標達成に貢献できたらと思います。また、フィールドワークをはじめとした個体レベルの研究を展開する研究者の方々との共同研究を通して、自身の研究をより分野横断的なものへと発展させたいと考えています。さらに、私たちが得意とする構造生物学などの手法を用いて、領域内で行われている様々な研究対象に対し、よりミクロな視点での知見を提供する形で作用機序の解明に貢献できたらと思います。

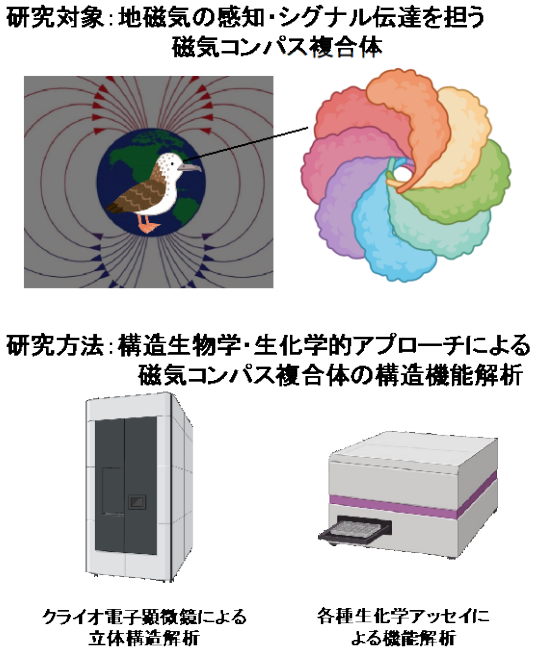


図１．本研究の概略図

Created with BioRender.com.

公募研究 A01 フィジカル班：

自律移動物体に関わる認知地図の神経機構の理解

佐藤 直行

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

環境の地図に関する記憶は「認知地図」と呼ばれています。ラットやヒトの海馬（大脳辺縁系の一部）には、場所細胞（特定の場所に居る場合にのみ活動する）やヘッドディレクション細胞（特定の方角を向いた場合にのみ活動する）が存在することから、認知地図を担うと考えられています。これまでの研究では現実の空間に加え、ＶＲ（仮想現実空間）を用い、海馬では空間移動や空間記憶の際にシータ帯域（4–12 Hz）の神経集団電位が増大すること、ヒトの場合には頭皮脳波からも関連成分が検出されることが明らかになっています。

これらの従来研究で用いられてきた環境空間は、他に動くもののない静的なものでしたが、実際の環境は自律的に動く物体にあふれています。特にヒト海馬はエピソード記憶（個人の経験の記憶）を担うこととも関連して、物体の位置に関する記憶（「どこで・なにが」の記憶）との関連が深いことが知られています。認知地図と移動物体はどのように記憶処理されているのでしょうか？

本課題では、没入型 VR 観察中の頭皮脳波を計測し、自律的に移動する物体と認知地図の対応づけに関する神経機構を検討します。VR 環境は移動物体を含めた環境を再現性よく観察者に提示できることが利点です。ただし、VR 観察時には視線や頭部が動くため、これに関連したアーチファクト（ノイズなどの脳波以外の信号）が計測信号に混じることが問題です。本研究では、脳波とともに視線運動や頭部・身体運動を同時に計測し、アーチファクトとは独立の脳波成分を抽出することで、信頼性の高い VR 脳波解析手法を構築します。本研究は、群衆を含むナビゲーションの神経機構の一旦を明らかにするもので、生物の階層ナビゲーション分野の発展に貢献します。

図１．自律移動物体に関わる認知地図の神経機構

公募研究 A01 フィジカル班：

重層社会における集団行動の個体群間・種間比較

前田　玉青

総合研究大学院大学・統合進化科学研究センター・特別研究員

ヒトは家族という小さな群れを作り、家族が集まって地域社会となり、それらがさらに民族・国家などさらに大きな社会集団となります。このような構造の社会を「重層社会」と呼び、ヒトの社会が複雑と呼ばれる一つの要因となっています。重層社会を作るのはヒトだけではなく、マントヒヒ、シャチ、ホロホロチョウの一種、アジアゾウ、ウマなど、さまざまな分類群で散発的に見つかっています。しかし、一度に集団全体を観察するのが難しいため、この社会の進化経路や機能については未解明な点が多く残されています。

そこで、私たちの班では、ドローンを使って空から重層社会をつくる動物を観察しています。空からならば、巨大な集団を一度に見渡すことができるからです。ドローンを使った研究により、私たちは野生化したウマが重層社会をもつこと、そして、ウマの重層社会集団のもつ特徴的な空間構造を発見しました。ウマのユニットたち（ヒトでいう家族のような、一番基本となる群れのこと）はお互い近くに寄ることは避けていますが、遠くに離れすぎることもせず、４０−５０ｍという中間の距離をたもって、付かず離れず、一緒に移動していくことがわかりました。今まで研究されてきた非重層社会の群れたちは、基本的に個体間距離は均一・連続的で、近くの個体とのみ相互作用すると考えられてきましたが、ウマではそのどちらでもない、ということが示唆されたのです。

しかし、このような特徴的な空間構造がどのような機能をもつか、動物たちがどのようなメカニズムで集まっているのかはよくわかっていません。そもそも他の重層社会で観察されるのかさえ謎です。今後、ウマの異なる個体群や、ウマ以外の重層社会を作る動物たちへと対象を広げることで、この謎を明らかにしたいと考えています。

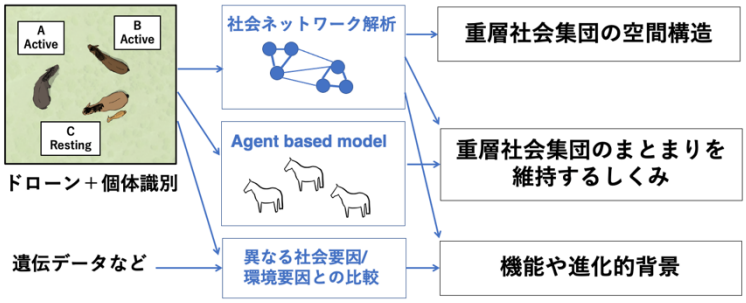


図１．さまざまな情報とドローンから得られる空間データ・動きのデータを組み合わせ、重層社会の機能やメカニズムを解明する。このフレームワークを他個体群・他種へも応用する。

公募研究 A01 フィジカル班：

捕食行動に利きを活用するナビゲーションシステムの神経機構

竹内　勇一

北海道大学・理学研究科・准教授

動物が獲物を狩るナビゲーション能力は捕食者に不可欠で、捕食成功を最大限にするように襲いかかります。食われる方もむざむざと食われているわけではありません。逃げる、隠れる、逆に脅すなどして自分の身を守るため、捕食者は逃げる餌動物の状況を捕捉しつつ、適切な意志決定をくだすことが求められます。餌動物を効率よく捕えるための有力な方法の一つが、捕食行動の「利き」です。多くの水生動物は餌動物を捕らえる時に利きを発揮します。この背景には、体の片側がもう一方よりも運動能力的に優れ、「利き側」を偏好して使うと捕食パフォーマンスが向上する共通原理があるためと考えられています。一方で、「利き」は脳の出力の左右差から生じるとされますが、関与する神経回路の複雑さや定量解析など研究戦略の難しさから、ほとんど手がつけられていません。

進化の実験室として有名なアフリカ・タンガニイカ湖には、他の魚の鱗をはぎ取って主食とする鱗食魚 *Perissodus microlepis* が生息します。彼らは口部形態が非対称で、捕食行動に著しい左右性を示し、効率的にウロコを摂食できるよう進化してきました。すなわち、左顎の大きな「左利き個体」は獲物の左体側を、右顎の大きな「右利き個体」は右体側の鱗を好んで狙います（図１）。捕食行動のシークエンスとしては獲物の後方から追跡し、利き側に回り込み、構え、胴を屈曲して、口を獲物に接触させて鱗を剥ぎ取ります。この一連の行動に左右性がみられることから、捕食ナビゲーションを制御する神経系の構成や活動に左右非対称性の存在を強く示唆しています。本研究では、捕食の鍵を握る利き行動の左右性を司る脳内制御機構の理解を目的として、鱗食魚の捕食行動とそれを駆動すると予想される視覚入力系や後脳 M 細胞入出力系の関係をとりあげ、神経科学的、行動学的、機械学習技術の融合アプローチから検証します。

図１．鱗食魚の利きと捕食行動の関係。口部形態と襲撃方向に明確な対応関係があります。

公募研究 A01 フィジカル班：

集団行動の長期追跡を用いたマウスにおける階層的インタラクションの理解

越智 翔平

東北大学・医学系研究科・助教

多くの動物は群れを成して生活し、個体間の相互作用（インタラクション）が現れます。モデル動物であるマウスを用い様々な神経科学の研究がなされてきましたが、集団飼育環境におけるマウスの社会性に着目した研究はほとんど行われておりません。本研究では、申請者が新規に開発したマウスの群飼環境に適した自動行動解析システムインテリプロファイラー（未発表）を用い、フィジカル空間にて社会性、活動性等の指標をもとに大集団の長期行動を追跡するとともに、サイバー空間にて集団ネットワークの推定や集団下における移動モデルの開発を目指します（図 1）。社会性が低い特質が予想される自閉スペクトラム症（ASD）モデルを集団に追加することや、反対に集団環境に順化した個体を隔離することによって集団行動に対する介入を図り、マウスの集団社会やインタラクションの形成に至るメカニズムを解明します。本研究は、群れで行動する生き物の行動原理の理解を進めることに加え、集団行動が困難な ASD 患者の行動特性に関するトランスレータブルな知見に貢献することが期待されます。

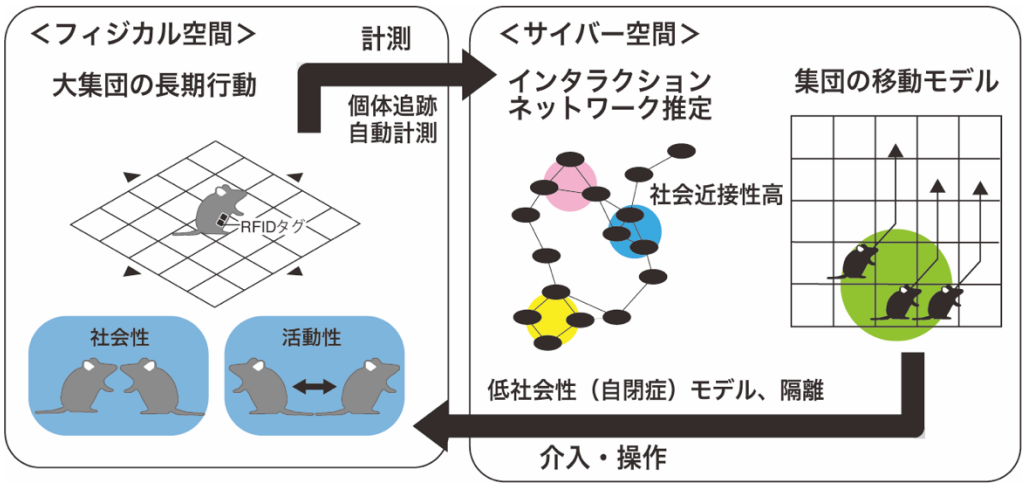


図１．本研究の全体像

公募研究 A01 フィジカル班:

アワビの移動と漁業者のアワビ探索を考慮した資源量推定法の開発

松本　有記雄

東京海洋大学・水圏科学フィールド教育研究センター・准教授

漁場内の資源量（個体数）の変動を把握し、漁獲対象種の乱獲を防ぐ資源管理型漁業は、持続的漁業に不可欠です。漁獲量の多寡は資源量と相関すると想定されているため、現在は漁獲量の変化が資源変動の指標となっています。しかし、漁業者の漁獲への熱心さや漁業対象種が漁場内外を移動することで漁獲量が容易に変化します。本研究では、漁獲生物と漁業者の行動を反映した資源量推定法を開発することでこれらの問題を解決することを試みます。

本研究では、餌である海藻の季節消長に合わせて移動するエゾアワビ（研究１）と漁業者のアワビ探索行動（研究２）をモデル化し、両者を組み合わせた仮想漁場モデルを構築します（研究３）。研究の過程においては、サイバー班が開発するχログボットやシームレス Cyber Physical System を活用することで、効率的にデータ取得できることを期待しています。

先行研究から、漁期中に漁場外から漁場内に移入するアワビの存在や海藻周辺にアワビが蝟集し、それを漁業者が狙って漁獲することが示唆されています。これらアワビと漁業者の行動は、アワビの採れやすさ、すなわち漁獲量をもとに行われる資源量推定に影響します。仮想漁場で得られた漁獲量を用いることで、従前の資源量推定の問題点を明らかにすることや、新規推定法の開発が可能となります。本研究が目指す漁獲対象種と漁業者の行動パターンを取り込んだ資源量推定は、今後の資源管理型漁業の模範となりえると考えています。

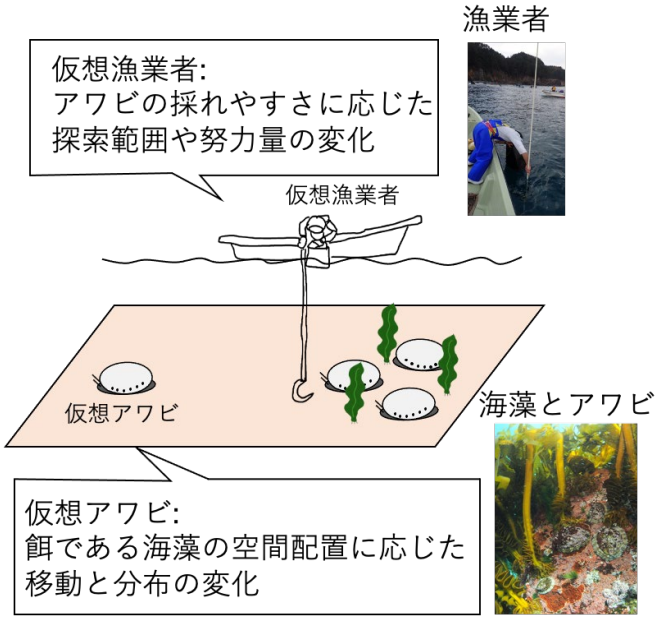


図１．アワビの移動と漁業者の漁獲パターンをχログボットなどにより解明します．得られたパターンをモデル化し、仮想漁場を構築します。

公募研究 A02 サイバー班:

鳴禽の社会関係構築から探る 生物の社会ナビゲーションとその計算モデリング

外谷 弦太

東京大学・先端科学技術研究センター・特任助教

個体はいかにして集団のなかに自己を定位し、居場所を構築していくのでしょうか。社会を形成する生物において、個体間やサブ集団間の関係性、順位構造は階層性を持つ位相空間として表現でき、構成員の時間的・認知的資源や行動動機はそれらに埋め込まれたパラメータとして扱うことができます。そのため、新規個体が集団に参入・帰属する過程で自身に最適なニッチを探索する行動は、一種のナビゲーションとしてモデル化・分析が可能です（図 1）。個体にとっての社会的なニッチとは、自他の行動を予測可能にするインセンティブの集合、すなわち個体の反応喚起戦略に対する他個体の反応のセットと解釈できるため、行動ダイアグラムとよく似た因果関係を仮定できます。ゆえに、実験室内で社会関係構築が観察できる動物モデルと、その行動を多面的に観察し定量化する手法があれば、階層ナビゲーションの概念に基づく、社会的行動の分析と社会構造の形成過程が観察可能となります。ジュウシマツのような鳴禽類は、鳴き交わし（音声コミュニケーション）や他者羽繕いといった社会関係への相互投資が観察される点で、ヒトと同じくマルチモーダルな交換行動を通じて他個体との関係を形成する動物であり、社会ナビゲーションの動物モデルになりえます。本研究では、マイクアレイによる音源定位と深層学習による位置情報推定・行動分類を組み合わせ、鳴禽の社会的相互作用を追跡・分析することを通して、社会ナビゲーションの計算モデルを構築します。また、これを個体ベースの群行動シミュレーションに組み込むことで、集団の全体的振る舞いを予測・説明する枠組みを作ります。

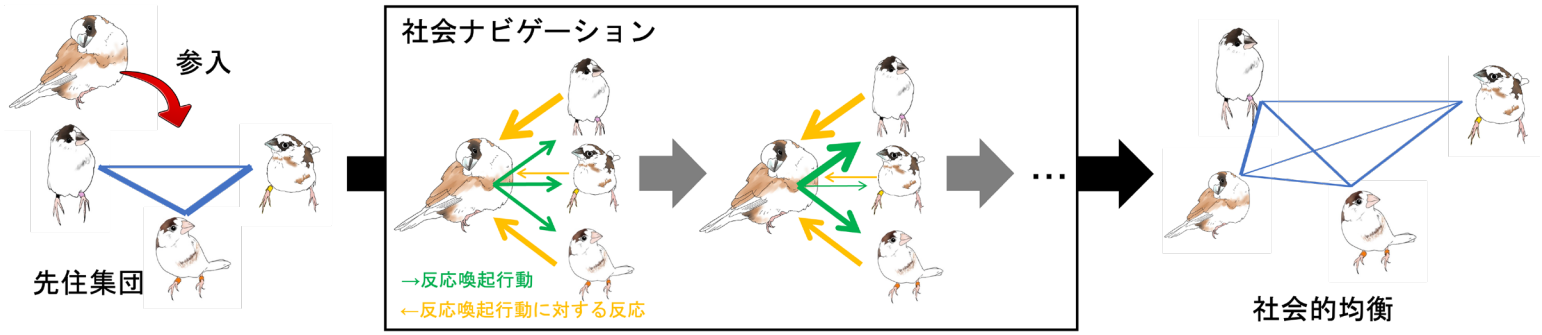


図 1．新規個体の参入と社会的均衡の変化

公募研究 A01 サイバー班:

ROBOT-SHEPHERDING の実現に向けた階層型異種エージェント間相互作用メカニズムの解明

角田 祐輔

兵庫県立大学大学院・工学研究科・助教

「生き物の群れはなぜこんなに美しく振る舞うのだろうか？」世界中の多くの研究者を魅了する学術的問いであり、自身が大学生の頃からずっと抱き続けている疑問です。このような私に研究の機会を与えてくれた本学術変革の先生方にこの場を借りてまず御礼申し上げます。

さて私は、図 1 左に示す「牧羊犬のヒツジ追い現象」に関して研究しています。この現象は、少数の牧羊犬が多数のヒツジの群れをある目的地へ誘導する現象であり、ニュージーランドの牧場で見られます。たった 1~数頭の牧羊犬が 100~1000 頭規模のヒツジの群れを誘導することもあり、その振る舞いの様子は非常に圧巻です。また、この現象は制御の観点から考察すると、多数の自律移動エージェント群を、少数のコントローラエージェントが、自信の高い機動性を活かして、時・空間的に移動しながら群の外部から入力を加えて間接的にナビゲーションするような、非常に興味深いシステムとして捉えることができます。私はこのようなシステムを「シープドッグシステム」と呼び、このシステムのカラクリ(制御原理)および設計論を明らかにすることを目的として、シープドッグ型ロボット群ナビゲーションシステムの開発や誘導安定性の解析などの研究をしてきました。

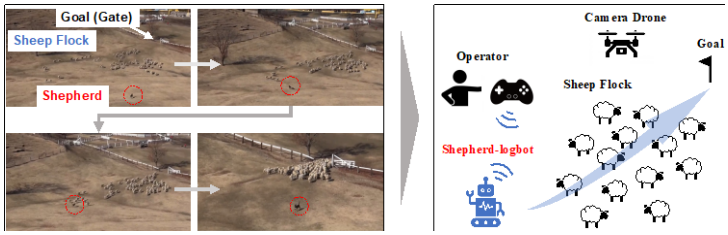


図 1 . Robot- Shepherding System

さて本学術領域では、図 1 右の Robot-Shepherding System の構築に向けた、牧羊犬ロボットによる実際のヒツジの群れへの行動介入および異種エージェント間の相互作用モデルの推定を行います。先行研究では、実際の牧洋犬やヒツジ群の行動計測はほとんど行われておらず、Boids model といった一般的な群れモデルや、観察に基づく誘導モデルを用いていました。それに対し本研究では、牧羊犬ロボットが与える外部刺激に対するヒツジの行動を、空撮用ドローンや GPS データロガーにより計測します。得られた動画や GPS データをもとに、両エージェントの行動軌跡の時系列データへ変換し、従来観察に基づいて提案されてきたモデルへのパラメータフィッティングや、制御工学で用いられる非線形システム同定法、逆強化学習法等を駆使して、ヒツジの群れと牧洋犬ロボットとの間の相互作用モデルを模索します。

公募研究 A02 サイバー班:

海鳥の移動中の風速計測バイオロギングシステムの開発

高橋 英俊

慶應義塾大学・理工学部・准教授

アホウドリなど大型の海鳥は、蛇行しながら滑空し海面の横風の鉛直勾配を使って飛行するダイナミックソアリングを行うことが知られています。こういった飛行形態では、海鳥が受ける相対的な対気速度が揚力や抗力を左右するために長年注目されてきました。バイオロギングの手法を用いて海鳥の飛行中の対気速度を明らかにするには、海鳥に風速センサを取り付け、対気速度を直接計測することが望ましいですが、センサには防水性、小型軽量、低消費電力などの厳しい要求仕様が求められるため、既存のセンサでは計測が困難でした。

そこで、海鳥に取り付け可能なピトー管型の防水風速センサによる計測システムの構築を目的とします（図 1）。

風速センサは、中空の円柱と球によって構成され、円柱の先端が動孔となり、また円柱の側面に開いた穴が静孔となっています。動孔と静孔の圧力差を検知するための MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)の差圧センサが球内に配置されています。また、ナノ開口構造を持つ膜を管の孔に貼り付けることで防水機能が付加されています。ナノ開口構造は空気を通すため風速による圧力が検知できる一方で、ラプラス圧によって深度 10 m に相当する 0.1 MPa 以上の水圧に対しても浸水を防ぐ機能を有します。

本研究では、研究開発したシステムを利用し、バイオロギングによる実際の海鳥の飛行中の対気速度を明らかにすることを目指します。

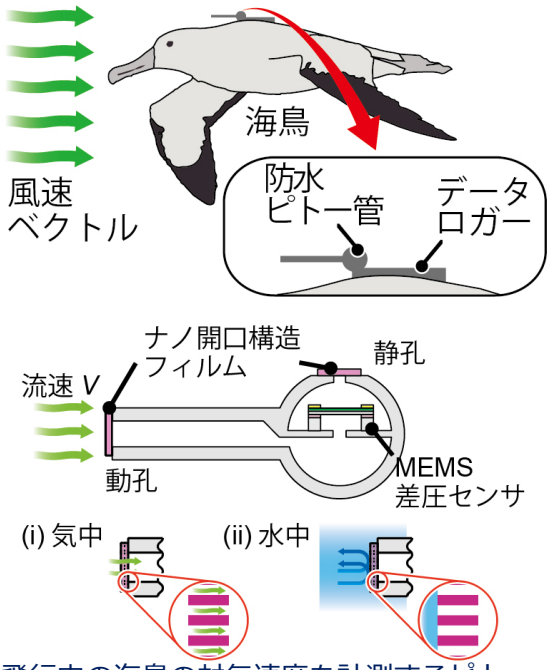


図１．飛行中の海鳥の対気速度を計測するピトー管型の流速センサの概念図。

公募研究 A02 サイバー班:

多様な生物集団における階層ナビゲーション理解のための機械学習ベースモデリング

筒井 和詩

名古屋大学・大学院情報学研究科・特任助教

生物は多種多様な環境や他の生物種と相互作用し、それに適応するように世代を重ねてきました。この自然淘汰のなかで、多くの生物種は集団（群れ）を形成し、他個体と協力するようになったと考えられています。このような集団形成に関わる個体間・集団間の階層的相互作用は、生物学や社会学をはじめとする広範な研究領域に影響を及ぼす、重要なトピックです。

生物集団の研究では様々な理論やモデルが提案されていますが、既存の理論やモデルは限られた場面しか説明することができず、生物集団の階層的相互作用を統一的に記述することはできていません。これは生物自体が遺伝に基づく生得的な要因と環境との相互作用に基づく後天的な要因の両方に基づいて行動するため、完全にル ールベース（生得的）、あるいは完全に学習ベース（後天的）でモデル化する従来の方法では生物学的に妥当かつ柔軟なモデルを構築することが困難なこと、生物集団における特定個体への神経活動操作（神経回路の活性化・抑制など）が困難なことから、多くの場合、集団の動態に関わる個体の行動特性とそれを支える神経基盤という要素間の相互作用や因果関係を検証できないこと、などに起因します。

本研究では、生物学的知見を導入した深層学習モデルとそれに基づくマルチエージェント・シミュレーション環境を構築することで、集団の動態と個体の行動特性との関係性を（図１右）、さらにフィジカル班との連携によって、個体の行動特性とそれを支える神経基盤との関係性を（図１左）解明することを目指します。

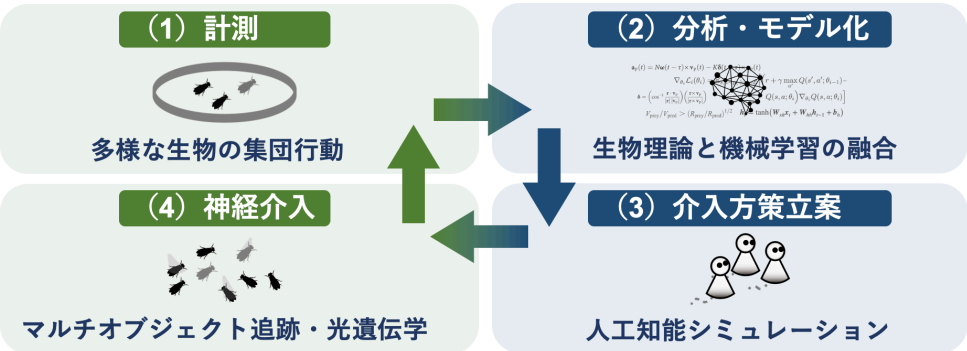


図１．本研究の循環的なアプローチ

公募研究 A02 サイバー班：

なぜ迷うかを科学する～VR 迷路移動時における脳波への介入による行動の変化～

船瀬　新王

国立障害者リハビリテーションセンター研究所・研究部長

ヒトが目的地を目指して移動する時には、慣れた道以外では「迷い」が生じるのは当たり前のことだと思われます。この「迷い」というものはどうして生じるのかについてはいまだ明らかではないことがたくさんあります。

ただ、「迷い」を研究しようと思うとどのように迷いを定義するべきかという問題が生じます。そこで、「迷い」はヒトが経路を覚える・想起する過程において生じるものであると定義します。その上で、本研究では逆説的に経路を覚える・想起するという点に着目して研究にし、「迷い」の解明に迫りたいと思います。

今回は、ヒトがコンピュータディスプレイ上でキーボードを利用して「迷路（VR 迷路）探索（図１参照）を遂行しているときに動物実験で得られたような脳波信号が出現するのか？（図２参照）」と「迷路探索を遂行しているときの脳波信号を邪魔することにより空間記憶をコントロールできるか？」という問を解決したいと考えました。

この問いに対して、「VR 迷路課題遂行中のヒトより脳波を測定し、進行方向の意思決定に関与する信号成分を特定する」という目的と「VR 迷路課題遂行中のヒトに対して、先の目的で特定した信号成分を tEIC / tDCS により阻害し、空間記憶が増強・減弱する事を確認する」という目的を設定して、本公募期間内にて結果を得ることを目指します。

本研究の特色は、「進行方向の意思決定に関与する信号成分を特定し、この信号と、「迷い」状態との関連を明らかにする」、「ヒトの経路選択の意思決定に対して介入的な手法を導入し、「迷い」がなぜ生じるのかについて、今までに無い実験系を提案できる」という点にあります。

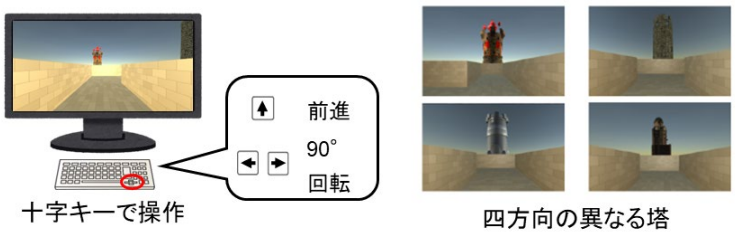


図１．VR 迷路探索の概略図.

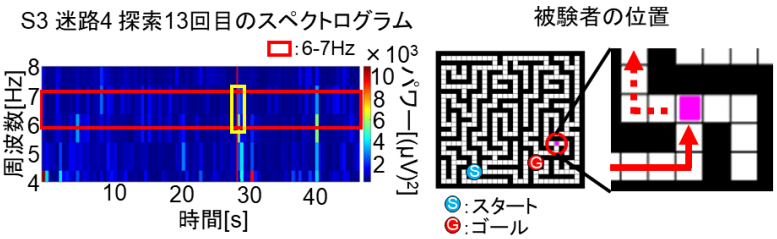


図２．予備実験の結果．分岐時の脳波変動を確認できる.

公募研究 A02 サイバー班：

慣性センサーを用いた生物個体の動態解析

水口 毅

大阪公立大学・理学部・准教授

多様な条件下において生物個体はどのように運動しているかという問いを中心にすえ、個体から得られる実測データを運動学的に解析することによって、その動態を明らかにすることを目的としています。現在、GPSやカメラ、温度計・気圧計などの様々なセンサーが開発・実用化されていますが、我々は主として慣性センサーから得られる加速度と角速度の時系列を統合的に解析し、対象個体の運動の時空間挙動を多角的にとらえます。力・エネルギー・運動方程式などの物理的な側面、制御・情報伝達など工学的な側面、生物個体固有の生理学的な側面などを考慮し、数理モデルと組み合わせることで、生物個体の詳細な動態の解明を行います（図1）。

よく制御された測定条件下だけでなく、より自然に近い状態での行動を定量化することは、動物の行動を理解する上で極めて重要です。対象がヒトではない動物の場合は、装置の取り付け・回収も容易ではないのですが、そこから得られるデータには、その環境に置かれた個体の一挙一動が反映されていると期待されます。生き物には、各個体に共通の性質もあれば、年齢・性別・大きさなどの個性もあります。そして、個体同士の関係は集団的な運動の背景にあるメカニズムを紐解く重要な鍵になると考えられます。複数個体の動態を解析することで、それらを詳らかにすることを目指します。

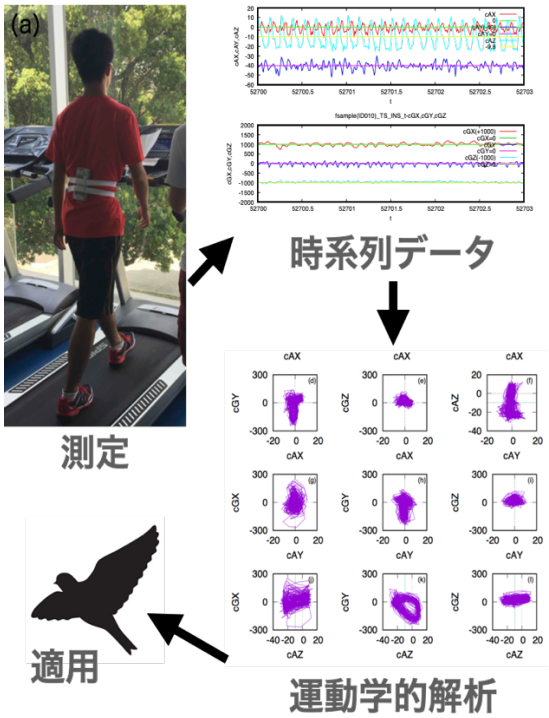


図１．制御された環境下での測定を通して慣性センサーから得られる時系列データを運動学的に解析し、個体の運動状態を特徴づけます。得られた方法を，より一般的な環境下での動態に適用します．

研究成果紹介：

荒波と暴風の中で飛立つ ワタリアホウドリ

上坂　怜生

東京大学大気海洋研究所・特任研究員

背中にデータロガーを付けたワタリアホウドリ
（撮影：後藤佑介）

風や波などの海洋環境を観測する手段には限りがあるため、海鳥の秒単位でめまぐるしく変わる行動に対してこれらの海洋環境がどのように作用しているのかを調べるのは非常に困難です。この研究では海鳥の行動記録から、気象観測や気象予報モデルでは分からない海洋の局所的な風や波の大きさを推定し、これらが海鳥の行動に与える影響を調べました。その結果、地球上で最も大きな飛翔性海鳥であるワタリアホウドリ[注1)]の飛び立ちが風や波の存在によって大きく助けられていることが明らかになりました。

研究背景

海洋に住む生物は、風や波などさまざまな環境から影響を受けながら生活しています。しかし、例えば海鳥がある場所を飛んでいたとして、そこにどのような風が吹いていたのかを知ろうとすると、これは非常に困難です。なぜなら、海洋で気象観測が行われている場所には限りがあり、海鳥がたまたまその観測点を飛んでいない限りその海鳥の周辺環境は分からないからです。海洋のある場所についてピンポイントで、特定の時間の風の強さや波の高さを調べるのは、気象予報モデルなどの計算能力が向上している現代でも意外と簡単ではありません。

渡り鳥の経路のような時空間スケールの大きな行動を調べる場合には、調査動物と気象観測の間にある場所や時間のずれはある程度無視することができます。しかし、海鳥の一瞬の飛び立ちなど、秒単位で変化する行動を調べようとするとこの問題はより顕著になります。

海鳥にとって飛び立ちは非常に重要です。なぜなら、飛び立つ時には海面から自分の体を浮かせるために翼と脚を必死に動かす必要があり、ちょうど人間の全力

疾走のように非常に体力を消耗するからです。特に、普段は風の力を利用してほとんど体力を使わずに飛んでいるアホウドリ類のような海鳥にとっては、飛び立ちが 1 日の中で最もエネルギーを消費する瞬間であり、1 度の旅で消費するエネルギー量が飛び立ちの回数に左右されてしまう程です。そのため、飛び立ちが風や波から受ける影響を調べることは、気候変動が起こっている中での海鳥の将来を予想するための鍵を握っています。

内容

この研究では、世界で最も大きな飛翔性海鳥であるワタリアホウドリにデータロガー[注 2)] を装着することで移動経路や体の動きを記録し、彼らの飛び立ちを調べました。そして、飛び立ちの瞬間の風の強さや波の大きさを、飛び立ち直前の海上での動きや飛び立ち直後の飛行経路から推定しました。ワタリアホウドリが海面に着水している間は、自分から体を動かすことがあまりないため、基本的には波に任せてブイのように漂っています。そのため、浮かんでいるときの上下方向の運動を GPS の記録を元に調べることで波の高さを計算することができます。また、ワタリアホウドリの飛行は前述の通り風の力を利用しており、飛行スピードや飛行方向が風に大きく依存します。そのため、飛行経路を詳細に調べることで、風の強さと方向を逆算することができます。これらの方法によってこの研究では一般的な観測値や気象予報モデルでは入手できないワタリアホウドリの周辺の局所的な海洋環境条件を推定しました。

飛び立ちがどの程度容易にできたかは、翼や脚の運動量を調べることで判断しました。ワタリアホウドリに装着したデータロガーには、加速度計と呼ばれる、体の動き(揺れ)を記録するセンサーが搭載されています。ワタリアホウドリが飛び立ちを始めると、加速度計には翼の運動に起因する上下方向の揺れや脚の運動に起因する横方向の揺れが記録されます。これにより、羽ばたきの回数や離水までにかかった時間といった、飛び立ちの労力の指標を求めることができます。つまりこの研究では、ワタリアホウドリに装着したデータロガーの記録から、「波・風・飛び立ちの労力」の 3 つを推定するというアイデアを実現しています（図 1）。

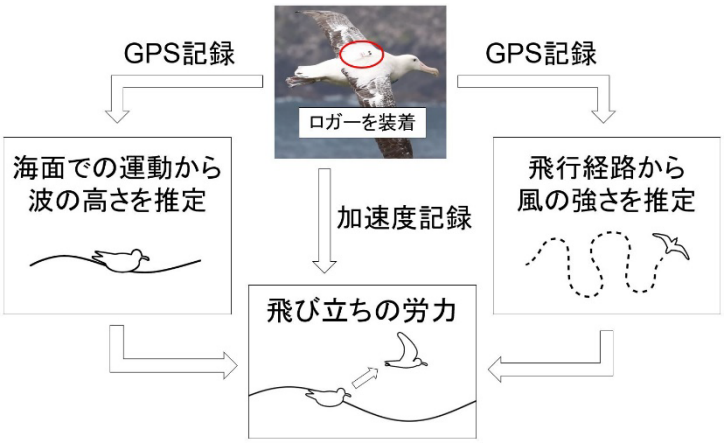


図 1 研究アイデアの概念図

主な結果と考察

この研究の結果、海洋環境条件と飛び立ちの労力、例えば波の高さと離水までにかかった時間を比べると、波が高ければ高い程より短い時間で飛び立てることが分かりました。飛び立ちの労力を評価したほかの指標を見ても、基本的に風が強く波が高い場合には少ない羽ばたきで素早く飛び立てることが分かりました（図 2）。

つぎに、風と波が飛び立ちに与える複合的な影響を調べるため、飛び立ち時の環境条件を風の強弱と波の高低で 4 つのグループに分けて比較しました。すると、風と波の両方が弱い場合にのみ飛び立ちに必要な労力

が増え、風か波のどちらか一方さえ強ければ容易に飛び立てていることが判明しました（図 3）。線形混合モデル[注 3)] を用いたシミュレーションでも同様の結果が得られ、ワタリアホウドリの飛び立ちが風と波の両方の存在に助けられていることが明らかになりました。さらに、ワタリアホウドリは目的地の方向に関わらず風上の方向（向かい風）に飛び立つことも確かめられました（図 4）。

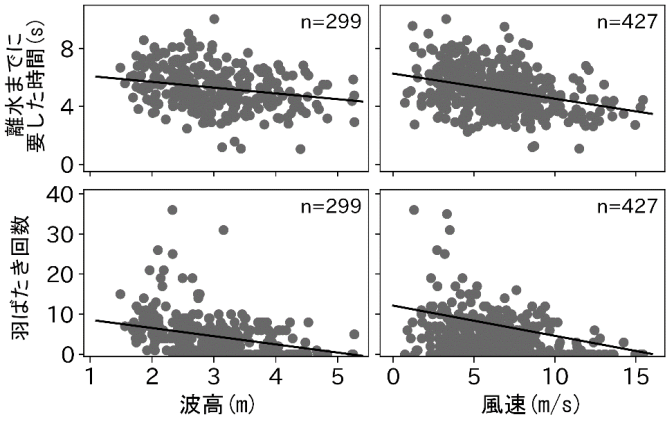


図 2　ワタリアホウドリが飛び立ちに要する労力と環境条件(波高・風速)の関係。飛び立ちを開始してから海面を離れるまでの時間（上段）や飛び立ち時の羽ばたきの回数（下段）が波高（左列）や風速（右列）が大きくなるにつれて減少していることが分かります。

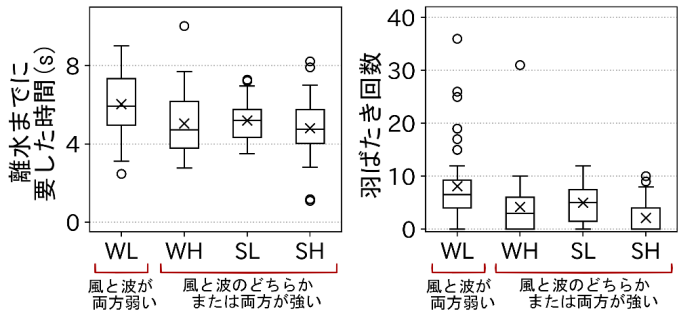


図 3　飛び立ちに要する労力に対する波高と風速の複合的な影響。 飛び立ち時の環境条件を風の強弱と波の高低で 4 つのグループに分けて比較した結果、風と波が両方とも弱い場合（WL）にのみ飛び立ちに要する労力が大きい結果となりました。風は弱いが波が高い場合（WH）や逆に風は強いが波が低い場合（SL）、風と波の両方が強い場合（SH）には労力が小さくなっています。×印は各グループの平均値を表しています。

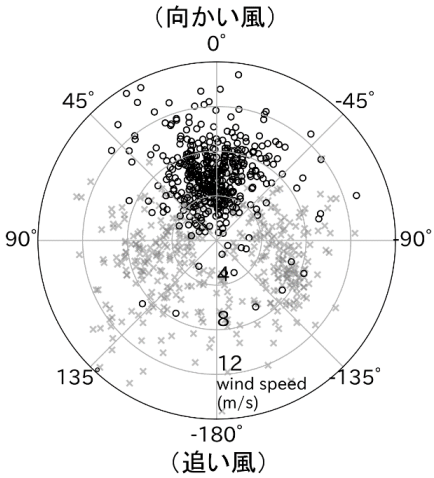


図 4　風向に対する相対的な飛び立ち方向。風向に対する相対的な飛び立ち方向を表した黒丸の分布が 0 °（向かい風）の方向に偏っており、ワタリアホウドリは風上に向かって飛び立つ傾向が高いことが分かります。また、灰色の×印は飛び立ち後 5 分間に移動した方向を表しており、必ずしも向かい風方向には偏っていないことが分かります。つまり、ワタリアホウドリは行き先に関わらず飛び立つ際には一度風上の方を向くということを意味しています。円の半径は風速を表しています。

風が強いと飛び立ちが容易になる理由は、ワタリアホウドリが風上を向いて飛び立つと風が強い時には翼が風を切る速度がよりあがり、大きな揚力[注 4)] を獲得できるためだと考えられます。また、波が飛び立ちを容易にする理由は完全には明らかにはなっていませんが、波の形状により風が弱い時にでも飛び立ちに好ましい上昇気流が生み出されている可能性が考えられます

今後の展望

これまで、アホウドリ類やミズナギドリ類[注 5)] などの海鳥が飛行する際には波の形状によって生み出された特別な上昇気流を利用しているという説が提唱されていましたが、これを確かめた実験は存在していませんでした。本研究はワタリアホウドリの飛び立ちが波によって容易になっていることを実験的に示すもので

あり、波浪がその後の飛行にも大きく関係している可能性を力強くサポートしています。

また、ワタリアホウドリにとって非常に体力を使う行動である飛び立ちの労力が海洋環境によって変わるのであれば、気候変動に伴って彼らの生息域が大きく変化することも予想されます。飛び立ちに伴うエネルギー消費量の計算がさらに進めば、海洋生態系の将来の予想や保全の計画をさらに適切に行うことができると考えられます。

【用語説明】

注 1）ワタリアホウドリ（Diomedea exulans）：

空を飛ぶことができる海鳥の中で最大の種であり、体重は 10 kg前後、翼開長(翼を広げた時の大きさ)は 3m にも及ぶ。南半球に広く分布し広大な行動範囲を持つ。

注 2）データロガー：

動物に搭載し、GPS などのセンサーによって、移動経路といった行動記録を収集する小型のデバイスのこと。

注 3）線形混合モデル：

統計解析モデルのひとつ。本研究ではワタリアホウドリの個体差を考慮したうえで波高と風速(説明変数)が飛び立ちの労力(応答変数)にどの程度影響を与えるかを統計的に調べた。

注 4）揚力：

飛行機や多くの鳥が空を飛ぶ際に必要な、翼に発生する持ち上がる力のこと。揚力の大きさは翼が風を切る速度の 2 乗に比例する。

注 5）ミズナギドリ類：

アホウドリ類と同じような飛行の方法をとる海鳥のなかま。分類としてはアホウドリ科とミズナギドリ科は共にミズナギドリ目に属する。

論文情報

L. Uesaka, Y. Goto, M. Naruoka, H. Weimerskirch, K. Sato, K. Q. Sakamoto, (2023), “Wandering albatrosses exert high take-off effort only when both wind and waves are gentle”, *eLife*. 12, RP87016.

研究成果紹介：

集団行動における軌道予測

藤井　慶輔

名古屋大学大学院情報学研究科・准教授

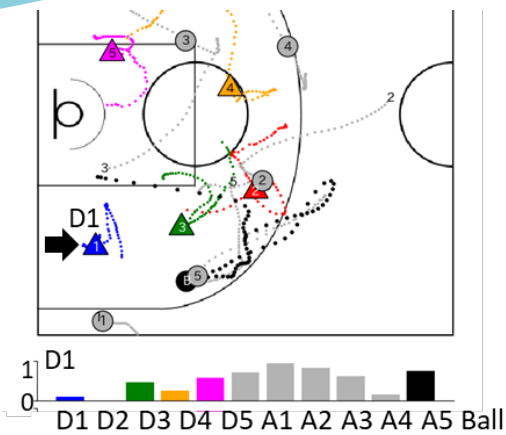


図 1 提案した軌道予測モデルによる、予測された軌道（上）と D1 選手が誰をどのくらい考慮して動いたかを示す棒グラフ（観測、下）。バスケットボールにおいて、２秒間の軌道を使って、６秒間の守備（カラー）の軌道予測を行った。攻撃選手は灰色で、実際の８秒間の軌道を示す。マークは４秒付近の位置（攻撃者のみ最終地点に番号をつけた）。下段は守備選手 1（D1）が誰を観測していたかを推定した値（0 は予測に影響を与えず、1 は大きく影響を与える）。

マルチエージェントによる実世界の行動規則を抽出することは、様々な科学・工学分野での重要な課題です。人工的なエージェントに比べ、生物の特徴は、個々が自律分散的に（独立して）行動し、他者を含む環境の全てを観測するわけではなく、限定された観測（部分観測）に基づき、さらに身体を有しているため物理的な制約（例えば慣性があるので急に動けない）の下で行動を行っていますが、従来のデータ駆動型モデルの多くはこれらの仮定を無視していました。これにより、行動分析における生物学的妥当性やモデルの解釈可能性に欠けていました。本研究では、分散型で部分観測と機械的制約を含む軌道予測モデルを提案し、エージェントの認知と身体のダイナミクスをモデル化して、生物学的に妥当な行動を予測することを目指しました（図 1）。このアプローチは、実世界のデータを使用して現実的な軌道を生成するためのマルチエージェントシミュレーターとして使用することを想定しています。

この論文のタイトル（Decentralized policy learning with partial observation and mechanical constraints for multiperson modeling）にもある分散型学習というのは、複数のエージェント（生物個体を想定）がそれぞれ独立して意思決定を行うシステムのことを指します。この手法では、各エージェントが中央集権的な制御ではなく、自分自身の情報や状況に基づいて行動を決定します。これは、実際の動物行動や人間の振る舞いに近い方法で、個々のエージェントが独立して行動する様子をモデル化します。「政策（Policy）」とは、人工知能の分野では、ある特定の状態に基づいて行動を出力する関数のことを指します。

具体的には、エージェントが現在の状況（例えば、周囲の環境や他のエージェントの位置）を入力として受け取り、どのような行動を取るべきかを出力します。

本研究では、より生物的な制約として、部分観測と機械的制約を深層生成モデルに入れて、分散型で政策の学習を行う方法を提案しました（詳細は最後の論文情報にコードのURLも掲載）。このような状態（または観測）から行動を生成するモデルをお手本となるデータから学習することを、一般的には模倣学習と呼びます。特に本研究では、深層学習モデルでよく用いられるアテンション機構という入力情報の重要な部分を認識する技術に、重要か/重要でないかのどちらかに極端に近づけるための Gumbel-Softmax 法を用いて、図 1 のように誰を考慮に入れて行動したかを可視化する方法を提案しました。さらに、図 2 に示すように、もしある選手だけ（ここでは攻撃選手 1 だけ）見ていたらどう動いていたか、という反実仮想シミュレーションも可能にすることが確かめられました。

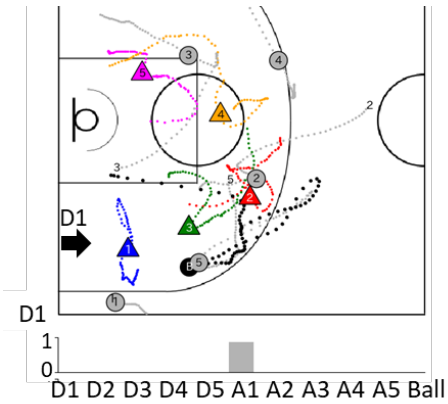


図 2 未来の 6 秒間について観測を 1 人だけ（例では攻撃選手 1）に操作した予測を行った。図 1 では守備選手 1 は攻撃選手 1 とボールのどちらも考慮に入れたスタンスを取って守っていたが、観測を攻撃選手 1 だけに操作したところ、攻撃選手 1 に向かう行動が予測された（これは 1 人しか考慮できない初心者等に見られる行動である）。

検証では、バスケットボール 100 試合（米の NBA の 1 試合約 48 分）や、サッカー45 試合（約 90 分）のデータを使って、学習と性能のテストを行い、提案手法の有効性が確かめられました。生物を扱う研究者にとっては、学習に非常に多くのデータの量が必要となると思われるかもしれません。実際、全ての要素が盛り込まれた提案手法を、スポーツのような複雑な軌道データから学習するにはそれなりのデータ量が必要になるかもしれませんが、よりシンプルな動きの軌道データで、より簡素化したモデルを学習する際には、そこまでデータ量が必要ではありません。

実際、この手法の応用例として、計画班代表の飛龍先生の研究室と共同で、国際会議ワークショップ論文が出版されました（下記の論文情報）。この研究では、コウモリが障害物を避けながら飛行する経路を予測するモデルをデータから学習し、コウモリの飛行パターンを予測することに成功しました。

本研究は、生物の行動パターンを理解するのはもちろん、その知識を応用して新しい技術を開発する上でも重要な役割を果たしています。動物行動学や生態学だけでなく、人工知能やロボティクスの分野でも、本研究は有益な知見を提供すると考えられます。

論文情報

- Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda, Decentralized policy learning with partial observation and mechanical constraints for multiperson modeling, Neural Networks, 2023. Code: https://github.com/keisuke198619/PO-MC-DHVRNN
- Shoko Genda, Yu Teshima, Taku Kawamura, Daichi Ohara, Keisuke Fujii, Shizuko Hiryu, Prediction of Bat Flight Path During Obstacle Avoidance by Imitation Learning, 2nd International Workshop on Behavior analysis and Recognition for knowledge Discovery (BiRD 2023) in conjunction with PerCom 2023, 2023.

研究成果報告：

カメラ搭載型バイオロガーを用いた野生生物の珍しい行動の自動撮影

谷垣 慶

大阪大学大学院 情報科学研究科 D1

私たちは、AI 搭載型のバイオロガーを用いて野生生物の観察を行っています。生物学において野生生物の出現頻度の低い行動を捉えることは、新たな仮説を生み出す重要なカギになります。このような重要行動を捉えるため、本研究チームでは以前より AI 搭載型バイオロガーを用いた研究を行っており、特定の行動（例えば採餌行動）が行われたことを検知して動画を撮影するといった手法を用いてきました。しかし、これらの手法では、既に研究者が認知している行動しか撮影することができないという点や、事前に教師あり学習用のラベル付きデータが必要であるという問題がありました。

そこで本研究では、教師なし学習を活用して、研究者によるアノテーションなしに自動で野生生物の出現頻度の低い行動を撮影する手法を提案しました。本手法では、常時稼働可能な加速度センサなどの低コストセンサを用いて対象生物を観察し、これらのセンサが珍しい行動を示す外れ値を検出すると自動的にカメラを起動して希少行動の記録を開始します。具体的には、初めにロガーを対象生物に搭載し、ラベルなしデータの収集を行います。ラベルなしデータは、カメラなどの電力消費の激しいセンサを利用しないため、比較的簡単に長時間のデータを収集することができます。次に収集されたデータに教師なし学習を適用し、高コストな外れ値検出モデルを構築します。ここで構

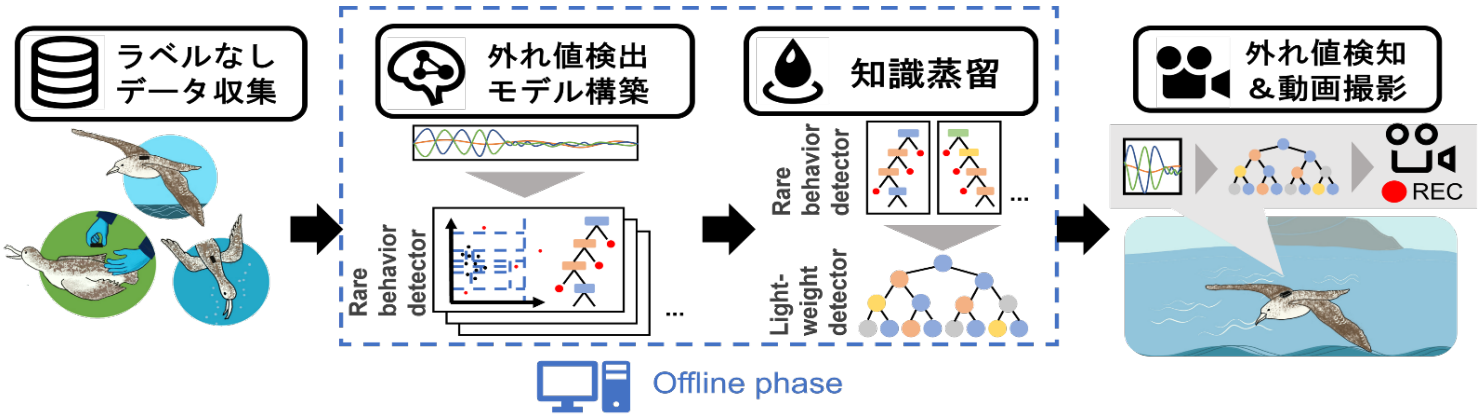


図 1: 提案手法の概要

築された外れ値検出モデルは、メモリの都合上そのままではバイオロガーに搭載することができません。そこで、外れ値検出モデルを知識蒸留することでロガー搭載用の軽量な外れ値検出モデルを構築します。構築された外れ値検出モデルをロガーに搭載し、外れ値が検出されたタイミングで動画の撮影を開始することで、希少行動の自動録画が可能となります。

本手法の有効性を確認するため、新潟県粟島の 18 匹のオオミズナギドリで実験を行いました。実験の結果、3 パターンの採餌行動と新たな行動パターンである頭振り行動を観測することができました。

（撮影された動画: https://www.youtube.com/watch?v=vmLDJFfaJ0M&t=83s）

今後は、より多くの種における検証実験や、より生物学的に重要な珍しい行動を撮影するための改善などを予定しています。

図 3: バイオロガーを装着したオオミズナギドリ

図 3: 新潟県粟島のオオミズナギドリ繁殖地

図 4: 観測された行動の 1 つである Surface Dive

論文情報

Kei Tanigaki, Ryoma Otsuka, Aiyi Li, Yota Hatano, Yuanzhou Wei, Shiho Koyama, Ken Yoda, Takuya Maekawa, Automatic recording of rare behaviors of wild animals using video bio-loggers with on-board light-weight outlier detector, PNAS Nexus, Volume 3, Issue 1, January 2024, pgad447, DOI: https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad447

若手向け企画報告：

勉強会(9/15)に参加しました

村上　友一

近畿大学・総合理工学研究科・M2

2023 年 9 月 15 日、学術変革領域研究(A) 「階層的生物ナビ学」の領域勉強会が開催されました。この勉強会では「介入系で挑む昆虫のナビゲーション戦略の獲得」に関して、国立情報学研究所の志垣 俊介先生と、「移動体の群制御理論の体系化」に関して、京都大学の櫻間 一徳先生がご登壇くださいましたので、報告いたします。

志垣俊介先生には、昆虫の匂い源への定位能力についてお話しいただきました。昆虫の定位能力と感覚刺激の関係性の解析前者の解析に関しては、カイコガの移動情報を仮想空間に取り込みエージェントを移動させる方法で解析データを取られていました。感覚刺激として匂い、風、視覚の 3 つの刺激を加えて実験されていました。その結果、すべての感覚刺激を使用すると定位成功率が最も高くなるといった結果でした。しかし、正しい情報を与える必要があるそうです。正しくない情報（前から匂いを漂わせているが、後ろから風を当てるなど）を与えると、慎重に行動するようになるようです。今後は障害物空間での実験を試みるとのことです。

櫻間一徳先生からは，分散システムでの移動体の群制御理論の体系化の視点からのお話をしていただきました。移動体の群制御には集中制御と分散制御があり、負荷が一点にかかる集中制御システムではなく、通信を移動体同士で行い、負荷がかかりにくい分散制御システムでの体系化を行っていました。しかし、分散制御にもローカル情報の不整合性の問題もあり、今回はこの問題を相対座標、キネマティックモデル、観測モデルを使用して最適化問題に落とし込み、解決されています。さらに、相対座標は不明な場合でも動くようにキネマティックモデルの変換行列を変化させることである程度対応できるモデルになっていました。実際の実験では移動体の個数が多くても、指示通りの形になるように移動していました。このような基礎理論を移動体群の行動原理の解明に使用する予定だそうです。

今回の勉強会で特に興味深く感じたのは、昆虫の匂い源への定位能力の行動解明についてです。ただ匂いのする方向に直進するのではなく、その他の情報と組み合わせて正しいかどうかを認識し、行動している点に驚きました。今後は様々な生物の行動を観察し、自身の研究にも役立てたいと考えています。

若手向け企画報告：

勉強会(10/20)に参加しました

池田　岳弘

京都大学大学院・農学研究科・M1

2023 年 10 月 20 日、学術領域変革（A）「階層的生物ナビ学」の領域勉強会がオンラインで開催されました。今回は「動物の社会行動のリアルタイム検出法」に関して、名古屋大学の田中良弥先生にご講演頂きました。1 時間という短い時間ではありましたが、60 名以上が勉強会に参加し、質問も多数行き交う非常に濃密な講演でした。簡単に内容を報告いたします。

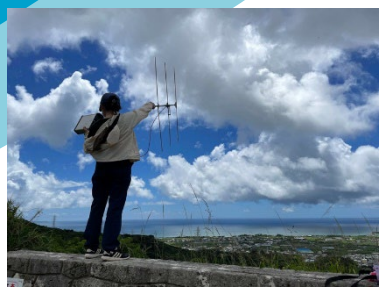
社会行動という「インタラクション」の機構を理解するためには、社会行動の最中に、動物の脳や神経がどのように動いているのかを解明する必要があります。そのためには社会行動をリアルタイムで検出し、それと同時に行動への介入・脳への神経介入を行わなければならず、社会行動のリアルタイム検出が必要不可欠となります。しかし、トラッキングベースの行動分類分析ツールでは複数個体をリアルタイムに解析できないため、社会行動には適応しづらい問題がありました。そこで YOLO といった物体検出の仕組みを用いて、同一個体内でも動物の行動や状態を別のオブジェクトとして認識・分類することで、動物の複数個体からなる社会性行動をリアルタイムに解析できることを示されました。本講演ではこれまでに試験された動物種・検出対象となる行動を具体的に紹介されており、マウスのグルーミングや瞬き、オオクロアリの栄養交換、ショウジョウバエの求愛歌、ゼブラフィッシュの社会性行動などを高精度で検出出来ることが示され、また個体 ID 付けを適用することで、特定の行動を示した個体に限定して「自動かつ低遅延」に光刺激と言った介入操作を与えることが可能になりつつあることも示されていました。リアルタイムで社会行動を検出することさえ出来れば、介入操作ができる刺激は光だけでなく、音や、匂い等さまざまだと思います。この技術が発展することによって、多くの種で社会行動のメカニズムを詳細に理解できるようになるようになると感じました。また。リアルタイムの行動検出による介入操作も非常に興味深いと感じましたが、行動を動きのあるものでは無く、静止画として区別し検出しているという点も非常に面白いと感じました。私の研究対象はスナメリで、ドローンによる観察を行っています。ドローンで得られた映像から静止画を切り出し、行動の検出が出来ればかなり面白いと思って聞いて思いました。ただ、質問でもあったように、「行動分類の基準をどこに置くのか」、「基準となる静止画をどうやって区別するのか」、このあたりは生物種に

よってはまだまだ不明確なことも多く、課題であるなと思いました。

　　ドローンも、深層学習もそうですが、技術の発達によって今まで出来なかった実験が実行可能になってきています。今回の勉強会の内容もその一部だと思います。これからも本領域の勉強会にも参加し、新たな知識を蓄えながら、私自身も研究活動をさらに発展させていきたいと考えています。

若手向け企画報告：

勉強会(11/17)に参加しました



藤谷　彰子

同志社大学大学院・生命医科学研究科・D2

2023 年 11 月 17 日、学術領域変革(A) 「階層的生物ナビ学」の領域勉強会が開催されました。この勉強会では「生物集団移動のデータ解析・強化学習・画像処理」に関して、名古屋大学 の藤井 慶輔先生、筒井 和詩先生と、伊藤 真先生がご登壇くださいましたので報告いたします。

藤井慶輔先生には、①観察データの相互作用分析、②介入実験の効果推定、③複数物体追跡についてお話しいただきました。①では、今後サイバー研究とフィジカル研究の共同研究を行うにあたり、連携の仕方をより良くするために共同研究者にアンケートを行われ、特にお互いの意見交換や質問等が気軽に出来るようなコミュケーションが大切であることをご報告いただきました。②では、集団軌跡の介入効果推定を行われており、予測を正確に行うためにはサンプルがかなり必要であり、野生動物を対象とした場合は適応が難しいこと、また反事実予測さえできれば、介入効果推定や仮想実験などが可能であることを教えていただきました。③では、トラッキング技術で自動追跡は完璧ではなく、人手の修正が必要なため、藤井先生のチームは物体検出・追跡アルゴリズムをベースに人手修正は Labelbox 等を使用して改善を目指されています。

筒井 和詩先生からは，コンスタンツ大学で行われた深層強化学習ワークショップの報告についてお話いただきました。このワークショップは、強化学習の研究が生物学にとっても身近なものとなってきていることを背景に開催され、Grid Word など基礎的な内容を中心に行われました。また、マルチエージェント強化学習環境をご紹介いただき、"Collaborative hunting in artificial agents with deep reinforcement learning"に関するコードが Github で共有されており、誰でも活用することができるようにコードを整理していただいています。

伊藤 真先生からは、トラッキングコンペと配布トラッキングプログラムについてお話いただきました。トラッキングコンペの内容は“アユの群れのビデオ映像化から各個体の位置をバウンディボックスで示す”で、ベースとなるトラッキングプログラムも Github で共有していただいていており、誰でも活用できます。ぜひ、参加しましょう！

今回の勉強会で、強化学習の研究が生物学においてもますます一般的なものとなってきていることに興味深いと思いました。自分のオオコウモリの移動に関する研究にも、今後取り入れていきたいです。

若手向け企画報告：

勉強会 (12/15) に参加しました

助川 桃枝

大阪大学大学院・情報科学研究科・研究員

2023 年 12 月 15 日、学術変革領域 (A) 「階層的生物ナビ学」の領域勉強会がオンラインにて開催されました。この勉強会では、明治大学の島袋羽衣先生による「海洋環境変動がウトウに与える影響に関する生理的評価」、京都大学の木村里子先生による「船舶航行がスナメリに与える影響に関する研究」の２つのご講演を頂きました。海洋は地球において大きな面積を占めるフィールドであり、多様な生物が暮らしています。今回の勉強会は、海洋環境に棲む生物の営みや人間活動による影響の調査・評価がテーマとなりました。

島袋羽衣先生には、海鳥であるウトウを対象とした生態学・生理学的観点からの調査結果についてお話頂きました。海洋の環境には緩やかな周期的変動が観測されますが、海洋の温度変化はウトウの餌となる魚の種類の構成の変化をもたらします。島袋先生のご調査により、餌条件の変化がウトウの生理的状態（特にストレスホルモンの分泌量）に影響を及ぼしている可能性が明らかになったことをご紹介頂きました。ウトウを捕らえて採血する際には、素早く採血しないと正しい血中濃度データが得られないというお話など、調査の細部の丁寧さが印象的でした。

木村里子先生には、イルカの仲間であるスナメリと船舶の関係についてお話頂きました。人間による船舶の航行は水中に騒音を引き起こし、海に棲む生物に影響を与えます。ご講演では、ドローン調査と音響観測を組み合わせた、日本沿岸の複数のフィールドにおけるご調査をご紹介頂きました。船舶に対するスナメリの回避行動の傾向や海域による行動の違いの可能性など、スナメリ行動における人間活動の影響の詳細な評価を伺うことができました。ドローンによる個体識別の試みなど技術的な工夫が凝らされており、海洋フィールドにおけるデータ収集の面白さと奥深さを感じました。

本報告の筆者は今年から「階層的生物ナビ学」領域に情報系の班の所属として参加しました。最近、初めて野外調査に赴く機会を頂きまして、「野外で調査をされる領域の皆様がどのようなクエスチョンと視点を持ち、どのように調査をしているか」を知ることが、豊かな研究とコラボレーションのために非常に大切であることを強く感じました。本勉強会への参加はフィールド研究の理解をさらに深める貴重な機会となりました。

若手向け企画報告：

勉強会(1/19)に参加しました

吉仲　瑞貴

京都大学・情報学研究科・M1

2024 年 1 月 19 日、学術領域変革(A) 「階層的生物ナビ学」の領域勉強会が開催されました。この勉強会では「バイオロギングデバイスで収集された加速度データと深層学習を用いた野生動物の行動認識」という題目で大阪大学の大塚亮真先生が、「鳥類繁殖コロニーの個体数：ドローンとバイオロギングの融合」という題目で名古屋大学の井上漱太さんがご登壇くださいましたので報告いたします。

大塚亮真先生には、バイオロギングデバイスの加速度データを用いた水鳥の行動認識についてお話しいただきました。野生生物を対象に深層学習を用いる場合、教師データの確保やデータ量の不均衡、生物やデバイスの個体差、そして行動が複雑になることなどが課題となります。課題を解決する手法として、データ拡張やマニフォールド・ミックスアップ、教師なしの事前学習についてご説明いただきました。特に興味深かったのはデータ拡張の手法です。データ拡張の手法にはスケーリングやノイズの付加など 6 つの方法があり、認識する行動のクラスや取り付けたセンサの数によって性能を向上する方法が異なるそうです。また、end-to-end の深層学習が機械学習と比較して良い性能であることも示されていました。

井上漱太さんには、ドローンとバイオロギングのデータを用いたウミネコの繁殖コロニーの個体数の推定についてお話しいただきました。群の個体数は重要な基礎情報ですが、コロニー内の全個体が繁殖地である島内にとどまるわけではないため、その推定が課題となります。ご説明いただいた手法では、はじめにドローンを用いて島全体を撮影することで島内の個体数を数えます。次に、バイオロギングデバイスを用いて一部の個体の移動軌跡を観測することで島の内外にいる確率を各時刻で計測します。そして、これらの情報から状態空間モデルを設計することで全個体数の推定が可能になります。観測誤差を正規分布としたときの 95%信頼区間は 24500～27500 匹となり、手法の有効性が示されていました。また、目視計測など別の手法と比べて効率的に計測が可能であり、短期間の変動を捉えることができるそうです。

今回の勉強会では同じ水鳥のバイオロンギングデバイスから得たデータの活用に関する研究についてお話しいただきましたが、end-to-end の深層学習による手法と、データとモデルを活用する手法という異なるアプローチを採用しており、興味深いと思いました。

若手向け企画報告：

勉強会(2/16)に参加しました

青木 耀大

同志社大学・生命医科学部・B4

2024 年 2 月 16 日、学術領域変革(A) 「階層的生物ナビ学」の領域勉強会が開催されました。この勉強会では筒井和詩先生(名古屋大学)が「生物学者・生態学者のための強化学習ワークショップ」と題し、強化学習の概説や、Google Colaboratory を用いて実習形式で深層強化学習について説明していただき、最後には自身が行っている深層強化学習を用いた協調的狩りに関する研究について紹介していただきました。

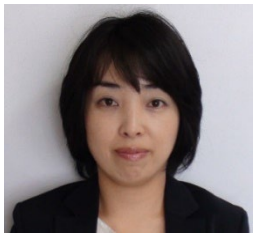
まず、強化学習の概説として､強化学習を扱う上で知っておくべき基礎用語や代表的なアルゴリズムから強化学習の実用例まで幅広くご紹介いただきました。簡潔でありながらも、要点を捉えたご説明により、強化学習の初学者である私でも理解することができました。深層強化学習と聞くと、複雑で難しいことをやっていると感じてしまいますが、実際はエージェントをニューラルネットワークで関数近似しただけで、強化学習の基本的な知識を持っていれば簡単に理解できるという話を聞き、深層強化学習を用いると、連続的な値を表現できるなどメリットが多数あることから、大変魅力的だと感じました。

また後半には、Dynamic Programing(動的計画法)と Monte Carlo methods(モンテカルロ法)に関して、実習形式で説明していただきました。この 2 つの手法の違いを、説明を聞くだけでなく、実際にコードを実装してみることで、より理解が深まりました。今回のコードを見てみると、想像よりもシンプルで短いコードであったため、こういったシンプルなコードでもさまざまなことができるんだと驚きました。

最後に、筒井先生が行っている自然界に広く見られる協調的狩りについて深層強化学習を用いてシミュレーションをし、生物学的意義を解明する研究についてご紹介いただきました。高度な認知能力が必要であると言われていた協調的な狩りを、非常にシンプルなマッピングでシミュレーション上で再現できたことから、今まで高度な認知能力が必要だと言われていた現象も実は単純なメカニズムからでも実現しうることを示されました。このように、実空間ではさまざまな要因で解明しづらい現象においても、シミュレーション上で再現することができれば、その生物の生態学的、神経科学的なプロセスを理解する手段となるため、生物学・生態学の分野におけるモデルの必要性を改めて認識することができました。

領域イベント参加報告：

第 66 回自動制御連合講演会に参加しました



飛龍 志津子

同志社大学・生命医科学部・教授

2023 年 10 月 7 日に東北大学　川内キャンパスにて，第 66 回自動制御連合講演会が開催されました．計画班の牧野先生にオーガナイザーをお引き受けいただき，「階層的生物ナビ学」のタイトルのもと，本領域によるオーガナイズドセッションを立て，5 件の講演を行いました．1 件目の講演は計画班の藤井班と飛龍班のコラボテーマである，模倣学習によるコウモリの飛行ナビゲーション予測に関して，手嶋研究員が発表しました（ちなみに手嶋君は，飛龍研卒業の後，藤井ラボに学振 PD としてお世話になりました．領域内の連携が若手育成にも貢献しています！）．2 件目は計画班の前川先生と依田先生のコラボとして，ログボットに関する最新の成果に関する発表が，3 件目は橋本研から人の動きに関するとてもユニークな発表（Human Relationship Recognition in surveillance views for human behavior analysis）の発表がありました．続いて，シャチの背びれの形状に関して，依田研の岡村君が生き物の形態の面白さを熱く，発表してくれました．最後は，昨今話題のワイヤレス給電を，野生動物の観察装置に応用する，というまさに本領域でしか実現できない，工学と生態学のコラボテーマに関する発表がありました．5 件の発表は，どれも一見，まったく違う研究分野のトピックですが，生物の階層ナビゲーションの解明，という壮大な研究テーマを軸に，見事なチームプレーが繰り広げられていると改めて実感しました．OS をやりなさい，と“神の声”をくださった領域代表の橋本先生，お忙しいところオーガナイザーを快く引き受けてくださった牧野先生，そして発表のために仙台に駆けつけてくださった講演者の皆様に感謝します．やっぱり対面は楽しいですね！

若手向け企画報告：

BLS8(3/3-8)に参加しました

大塚 亮真

大阪大学大学院・情報科学研究科

2024 年 3 月 3-8 日に The 8th International Bio-logging Science Symposium (BLS8) が開催されました。BLS の最初のシンポジウムが 2003 年に東京で開催されてから、約 20 年の時を経て、ふたたび東京での開催となったとのことです。ハイブリッド開催ではありましたが、予想以上に多くの方が現地参加されたようで、会場はたくさんの人々の熱気で溢れていました。特にアイスブレーキングパーティ、バンケット、コーヒーブレーク、ポスターセッションでは、近くにいても互いの声がはっきり聞き取れないほどの状況でした。そのため、多くの参加者が声を枯らしながら（？）議論や会話を楽しまれていたのではないかと思います。

BLS にはじめて参加した私にとって、一番大きな衝撃は研究分野と対象動物が多岐にわたっていたことです。バイオロギングという研究手法でつながっているものの、多様な分野（動物行動学、生態学、生理学、バイオメカニクス、物理学 etc.）と対象動物（クジラ、アザラシ、ウミヘビ、コウモリ、海鳥 etc.）の発表がランダムな順番で行われました。ときに頭の切替が追いつかないこともありましたが、それもまた良い思い出となりました。

そんななか、特に印象に残ったバイオロギング研究に関するトレンドのようなものが 3 つありました。1 つ目はビッグデータを活用した研究です。特にグローバルなスケールでの大規模データを活用する研究の発表が数多くありました。例えば、COVID19 のロックダウン時に複数の陸上動物がどのような反応をしたか（あるいはしなかったのか）、といった研究です。バイオロギングのコミュニティーに属する非常に多くの研究者たちが協力し、データを提供することなどによって成り立っていました。また生データの公開やデータベースの整備が今後はより加速していくだろう、と思わせる発表もいくつかありましたので、ビッグデータを用いた研究もさらに増加していくのかもしれません。

2 つ目は機械学習技術の適用です。加速度データから行動分類・認識を行ったり、音声データを分類したり、といった課題に機械学習がよく用いられていました。3 日に行われたワークショップでも、機械学習の

話題は注目を浴びていたように思います。私自信も加速度データで海鳥の行動認識を行う研究についてポスター発表を行い、たくさんの方々と議論することができました。手持ちのデータで行動認識がしたいというニーズはやはり多いようで、機械学習への関心の高さ、バイオロギングデータと機械学習の相性の良さを改めて感じました。一方、機械学習手法はそれぞれの研究で独自に開発され、異なる方法で評価がなされているという印象も受けました。バイオロギング分野において、手法の評価方法のスタンダードがより広く共有されると、比較や議論がし易くなるのではないかと感じました。

3 つ目はデバイスを開発する企業が提示したバイオロギング技術の進歩です。BLS8 ではたくさんの企業が自社のバイオロギング製品を紹介するブースを出展しており、コーヒーブレークの時間などに研究者と企業の方々が交流していました。また、BLS としてははじめての取り組みだったようなのですが、企業が自社製品やサービスについてに発表を行う時間も設けられていました。非常にたくさんのデバイスが展示・紹介されていましたが、特に小型化、リモート通信、ソーラーパネルの導入、エッジコンピューティングといった技術が目を引きました。小型化、リモート通信、ソーラーパネルの導入は多くの企業の製品にみてとることができました。おそらく企業間で競争が行われているのかと思いますが、これらの技術はもはや当然のスペックとなっているのかもしれません。エッジコンピューティングについては上述の機械学習をベースにして、これからどんどん盛り上がっていきそうな雰囲気を感じました。大阪大学でログボットの開発をしている私にとって、バイオロギングデバイスを開発する企業の最先端の技術力を目の当たりにしたことは大変良い刺激となりました。

BLS8 の最後に、次回の BLS9 は 2027 年の 9-10 月頃に、スペインのセビージャで開催されるというアナウンスがありました。私はスペイン料理が大好きなので、個人的にすごく魅力を感じました。ご縁があればぜひまた BLS に参加したいと思います。

領域イベント参加報告：

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIERARCHICAL BIO-NAVIGATION 2024 への参加報告

朱 麒融 D2

The University of Tokyo
Graduate School of Frontier Sciences

The International Symposium on Hierarchical Bio-Navigation 2024 showcased a fascinating convergence of technology and biological research, highlighting innovative approaches to studying animal behavior and environmental interactions. Presentations ranged from AI-enabled bio-loggers for wildlife monitoring, as introduced by Prof. Maekawa, to advanced multimodal bio-loggers like those used in Prof. Koike's study on Asian Black Bears underscores the significant strides in data collection methods.

A notable theme was the impact of climate change on animal foraging behaviors, as explored by Prof. Takahashi Akinori in his work on penguins and elephant seals. This research emphasized the adaptability of species to their evolving environments and underscored the value of integrated sensors in ecological studies.

The conference also delved into the neural mechanisms of navigation, with Prof. Takahashi Susumu comparing mammals and pigeons, and Prof. Sakura investigating honeybees' use of polarized light. These studies not only expand our understanding of animal orientation but also hold potential applications in navigation technology.

Machine learning and modeling were central to several presentations, with Prof. Fujii discussing their application in multi-agent behavior studies and Prof. Sumpter modeling group dynamics in fish and football. These approaches offer insights into collective behaviors and the potential for cross-disciplinary applications.

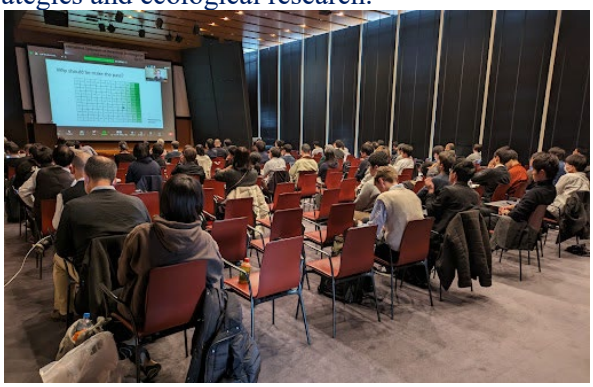
Practical applications of technology in conservation and industry were highlighted by Mr. Takahashi Kosuke's work with UMITRON in aquaculture, showcasing how remote monitoring can alleviate labor demands and reduce overfeeding.

In the realm of behavioral genetics, Prof. Tanaka's research on Drosophila provided a closer look at the neural bases of social behavior, while Prof. Nishimori's study on ants revealed insights into cooperative behavior and task allocation without a central leader.

Emerging technologies like the ultrasound phased arrays presented by Prof. Makino introduced novel methods for interacting with and studying insects, demonstrating the potential of non-invasive techniques in biological research.

Dr. Shigaki's work on silkmoths and robotic bodies highlighted the innovative intersections of biology and technology, suggesting new pathways for bio-hybrid research. Dr. Beery from MIT emphasized the challenges of building large-scale, well-distributed datasets in bio-navigation, advocating for collaborative data sharing to advance the field.

The International Symposium on Hierarchical Bio-Navigation 2024 not only showcased cutting-edge research but also emphasized the critical role of technology in ecological and behavioral studies. From AI and machine learning to advanced sensors and bio-hybrid systems, the integration of technology is opening new frontiers in our understanding of the natural world, promising transformative impacts on conservation strategies and ecological research.



(Picture of the symposium site)

国際研究活動報告：

香港科技大学における研究報告

谷垣 慶

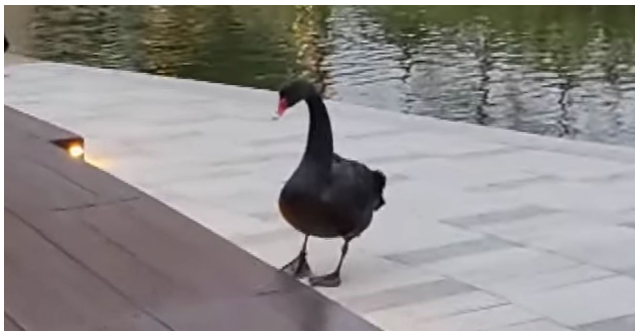
大阪大学大学院・情報科学研究科・D1

今回、階層的生物ナビ学の国際活動支援を受けて香港科技大学の Dr. Xia を訪問し、マルチモーダルセンサデータを用いた次世代アノテーションツールの開発に関する研究を行ってきたため報告いたします。

私はセンサデータを用いた人間や動物の行動認識に関する研究を行っています。行動認識技術とは、「飛行」「休む」「採餌」などの行動をセンサデータに基づき分類する技術のことです。修士課程における研究では、加速度センサや水圧センサなどの低コストのセンサから得られるデータから特異なデータを検出し、野生生物の珍しい行動の映像を自動的に撮影する技術の開発に取り組みました。今回派遣先で行った研究も、野生生物のセンサデータに関連するものであり、今までの野生生物のセンサデータの取り扱い経験から、本研究を実施している Dr. Xia を訪問する機会をいただきました。

本研究では、マルチモーダルセンサデータに基づいて、センサデータのアノテーションを行うツールを開発します。従来のアノテーションツールはその多くが動画データのアノテーションに特化しています。しかし、生物搭載型のバイオロガーを利用する場合は、制限された電池の重量、動画を撮影する際の大きな電力消費などの問題から、長時間の動画を撮影することは難しく、大量の動画データを用意することは困難です。そこで、本研究では、動画データのないデータにもアノテーションが可能なツールを開発することを試みました。具体的には、教師なし機械学習を用いてセンサデータの特性を分析し、それに基づいて研究者が動物の行動モードを推定します。

今回訪問した香港技科大学



大学のシンボルである Swan

本プロジェクトでの私の役割は、ユーザーインターフェイスの改善でした。センサから得られる生データは単純な波形データであり、データ量の観点から見ても、そのまま各生データに研究者がアノテーションを行うのは困難です。そこで私は、データの特徴空間分布を利用してアノテーションを行う機能を実装しました。このアプローチでは、センサデータを機械学習モデルに入力し、その出力を２次元まで次元削減することで、データの分布を視覚化します。これにより、データの類似性に基づいて隣接するデータ群を一括で選択し、効率的にアノテーションを行うことができるようになりました。

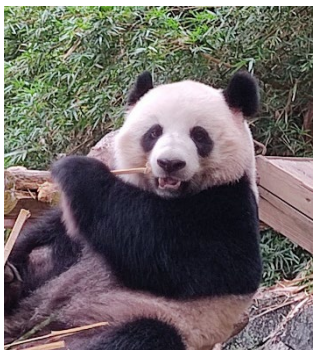
今回の研究で感じたことは、英語能力の必要性です。特に専門的な研究内容に関するディスカッションでは、意思の伝達が難しく、齟齬が生じてしまうことがありました。今後の国際的な研究に向けて、英語能力、およびコミュニケーション能力を磨いていきたいと思います。

他にも、研究チームのミーティングに出席したり、研究室メンバーの実験のアシスタントを担当したりしました。当然ミーティングは完全に中国語で行われるのですが、全く知らない言語のミーティングに出席して話を聞くというのは、今までにない不思議な感覚でした。

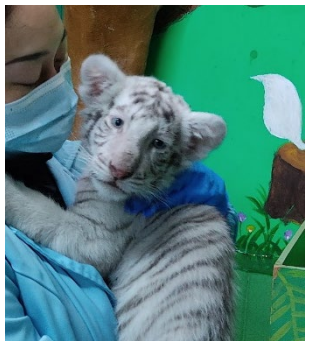
その他にも、現地でできた友人のおかげで、研究室メンバーとの交流はもちろん、深圳市のテクノロジーに特化したショッピングセンターや広州市の中心街、香江野生動物園などで、多くの新しい発見がありました。特に印象に残っているのは、友人のご実家に招待していただき、新春の伝統料理を味わわせていただいたことです。本当に貴重な体験となりました。中国では、基本的に英語を利用しないため、学生以外には言語がほとんど通じない環境でした。翻訳アプリを用いてコミュニケーションを取る生活は、今までにない奇妙な体験でした。

本研究を通じて、異文化に対する理解、英語におけるコミュニケーション、お互いを尊重する重要性などを学ぶことができ、より大きな視野を持つことができるようになったと感じています。今後も今回の経験を生かし、階層的生物ナビ学及び科学技術の発展に貢献していきたいと考えています。

今回の渡航に際し、階層的生物ナビ学からご支援をいただきました。階層的生物ナビ学及び今回の渡航をサポートしていただいたすべての方にこの場を借りて深く感謝申し上げます。



香江野生動物園のパンダ

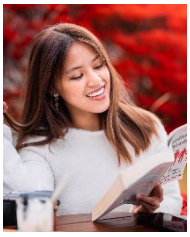


香江野生動物園のホワイトタイガー

ご馳走になった広州の伝統料理

国際研究活動報告：

Development of behavior analysis method for multiple animals using a deep learning model



Riza Rae Aldecoa Pineda

Nara Institute of Science and Technology · Doctoral Student

I stayed for three months from May 28th to August 26th, 2023 in École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Geneva, with the first two months spent for technical training under the AI Residency Program and the last month for research immersion under Professor Alexander Mathis' laboratory which was financially supported by the Young Researchers Overseas Dispatch grant of the Hierarchical Biological Navigation Program. My host laboratory was at Campus Biotech in Geneva.

Fig.1 Campus Biotech and members of AI residency Program with Professors Mackenzie and Alexander Mathis.

Prior to the research internship, we have already completed our monkey tracking system called DeepMAnTra[1], a cascade network that begins with a monkey detector and followed by a graph neural network for re-identification. This system is particularly strong on one major current issue in tracking, which is re-identification of individuals in moving cameras. However, our system uses box information, and although it was sufficient for our initial problem, we realized the need to incorporate pose information as well. We hoped combining DeepLabCut[2] into our architecture and using the resulting aggregate feature set for learning would give us a more discriminative set of behavior embeddings that may allow us to detect significant event bifurcations.

Our primary goal was to develop a robust deep learning-based framework for analyzing monkey social behavior from videos of interactions. Target outputs based on the primary goal were as follows: (1) to design a training architecture that incorporates both elements of DeepMantra (Ours) and DeepLabCut to handle both identification and tracking for moving cameras with both box and pose labels and, (2) to design a workflow for processing multi-modal information (pose, box, class, and behavior) to achieve a generalizable behavior model over a large set of primate species.

In line with these goals, we outline below our achievements over the three-month research sprint.

1. We have completed training for DeepLabCut from the original creators of the package.
2. We also have completed first-hand training on how to use CEBRA[3].
3. We designed a workflow (to be discussed below) that is inspired from both DeepManTra (Ours) and DeepLabCut multi-animal.
4. We also provide a proposed multi-task approach for multi-modal information (pose, box, class, and behavior) to achieve a generalizable behavior model over a large set of primate species.

The proposed method was realized with two characteristics.

1. Combining DeepManTra and DeepLabCut

Both architectures are large and have a similar backbone structure, therefore we designed an efficient way to integrate elements from both complex systems, that reduces redundancy. DeepLabCut currently has a multi-animal package that incorporates both top-down and bottom-up approaches, wherein keypoint estimations are refined through incorporating the bounding box information. However, in erratic videos, multi-animal DeepLabCut still fails to provide more accurate tracking results. To solve this problem, we acquire inspiration from DeepManTra's spatial feature-based tracking. By combining the keypoints and bounding box spatial features, we find the corresponding points in the succeeding frames using a Graph Neural Network equipped with both self- and cross-attention layers to learn similarities across the local (within the current frame) and global (current to the next frame) groups.

2. For behavior modeling of primate species

The proposed architecture (DeepManTra+ DeepLabCut) encodes the visual inputs (images/videos, bounding box, pose labels, class) into a feature set in lower dimensions. For behavior modeling, we include a text processing to represent behavior and include this in our feature set. We then design the next segment as a multi-task learning module wherein multiple parallel heads are stacked on the backbone model. In this way, our method is easily adaptable to subsequent and new learning tasks.

Currently, existing models have only been trained on a small subset of primates with most models fine-tuned on a single task. Our target model will serve as a unified model for pose, identification, and behavior classification of primates. Since our model will be trained on a large-scale dataset with different species of primates, we expect that fine tuning on different tasks using our model will be much easier and faster for researchers studying primates. We hope that this will have a positive impact on the research community and help boost more research on primates.

Overall, I had so much fun learning and doing research in my host laboratory. I had quick feedback on my outputs and I was encouraged to just directly message people for help or inputs. I was given the chance to meet top scientists in the world, including NASA scientists, and Jupyter project and Matplotlib lead developers. I also was given close supervision by Professor Alexander Mathis, one of the recipients of the Eric Kandel Young Neuroscientists Prize 2023, and received a lot of input on how to improve my work.

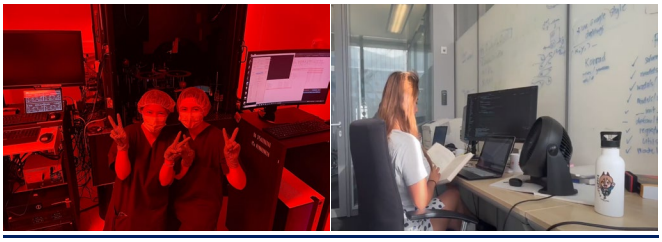


Fig. 2 Research environment

In summary, through the Young Researchers Overseas Dispatch grant of the Hierarchical Biological Navigation Program, we were able to design a workflow based on both DeepManTra and DeepLabCut and will provide a proposed multi-task approach for multi-modal information to achieve a generalizable behavior model. We hope that this will have a positive impact on the research community and help boost more research on primates through eliminating the bottleneck of data preprocessing. We would like to express our deepest gratitude to the financial support provided by the Hierarchical Biological Navigation Program through its Young Researchers Overseas Dispatch grant.

References:

1. Pineda, R. R., Kubo, T., Shimada, M., & Ikeda, K. (2023). Deep MAnTra: deep learning-based multi-animal tracking for Japanese macaques. Artificial Life and Robotics, 28(1), 127-138.
2. Lauer, J., Zhou, M., Ye, S., Menegas, W., Schneider, S., Nath, T., ... & Mathis, A. (2022). Multi-animal pose estimation, identification and tracking with DeepLabCut. Nature Methods, 19(4), 496-504.
3. Schneider, S., Lee, J. H., & Mathis, M. W. (2023). Learnable latent embeddings for joint behavioural and neural analysis. Nature, 617(7960), 360-368.

国際研究活動報告：

国際学会(2/20-2/25)への参加報告

島袋 羽衣

明治大学　先端数理科学インスティテュート　博士研究員

2024 年 2 月 20 日から 25 日まで、米国シアトルで開催された Pacific Seabird Group の The 51st Annual meeting（以下 PSG）に参加しました。私は今回が 3 度目の参加でしたが、現地へ出張したのは 2019 年（ハワイ）のみで、かつ、海外への渡航自体もそれ以来だったため、久々の国際学会への参加は非常に緊張感のあるものとなりました。しかし実際には、今回の PSG には 10 名ほどの日本人が出席しており、みなさんのおかげで安心して全日程を終えることができました。

聞きなれない方が多いと思いますが、PSG というのは太平洋域を中心に海鳥の研究・調査に携わる方々が集まる学会で、今回は 3 日間に渡って、20 ものトークセッションで様々な研究成果が報告されました。開催場所はグランドハイアットシアトルという非常に豪華なホテルで、参加者は約 300 名に上ったようです（図１）。日本から 10 時間近いフライトを経て到着したシアトルでは、まず初日に PSG 主催のフィールドトリップに参加しました。私が参加したフィールドトリップではバーク自然史文化博物館に行き、普段は見られないような数多くの収蔵品を間近でゆっくりと観察できました（図２）。また、標本を活用した歴史的・長期的観点からの研究活動について知ることもでき、非常に有意義な時間となりました。

2 日目からは、いよいよ楽しみにしていたトークセッションです。先述した通り本会議では多くのセッションが予定されていたため、3 つのカンファレンスルームを使用して、同時並行で発表が進んでいきました。私たち聴講者はお目当ての発表に見当を付け、あっちの部屋こっちの部屋を行ったり来たりしているうちに、あっという間に時間は過ぎ去っていきました。私が最も興味をひかれたのは、ウミガラスという海鳥の声に関する研究です（Katrina Wilcox さん、マニトバ大学）。海上でのウミガラスの鳴き声を小型ボートから録音して解析し、ウミガラスが群れへの合流時や個体認識時といったイベントに応じて、4 つのボーカルパターンを使い分けていることを示していました。この他にも多くの海鳥種、多くの繁殖地において様々な研究がなされており、特に、発表者の皆さんがそれぞれの研究対象種に愛着を持ってお話してされていることが印象的でした。どちらかというと、研究成果よりもその対象種の魅力についてアピールしているお話も多かったように思います。私自身は、「High Pacific Decadal Oscillation index is associated with poor

foraging conditions of rhinoceros auklets across their annual cycle」という題目で、3 日目のポスターセッションでの発表を行いました（図３）。予定は 2 時間でしたが、たくさんの聴講者に恵まれ、3 時間ほど有意義なディスカッションを行うことができました。発表を終えて自分の研究に不足している点が改めて認識でき、ディスカッションを通じて新しい研究アイデアも得られました。また、私が想像していた以上に聴講者の皆さんに興味を持っていただけたようで、研究を進めるうえでの自信にもつながりました。PSG で発表した研究成果については、ポスターセッションでのディスカッションを踏まえてさらなる磨きをかけ、国際誌へ論文として投稿する予定です。

こうしてたくさんの発表を終えた後に待っているのは、もちろん懇親会そして PSG ではおなじみのダンスパーティーです。このダンスパーティーでは生バンドの演奏に合わせて、参加者の身分や立場に関係なく好きなように踊ります。ついさっきまで PSG への貢献に関して表彰され舞台に立っていた大御所の先生や真剣にディスカッションし合ったような研究者らが自由に遠慮なくダンスで交流する様子はとても楽しく、PSG という学会の特徴を表していると思います。1 週間弱というあっという間の滞在でしたが、とても実りのある素晴らしい経験となりました。

国際学会への参加は費用がかかるという面でなかなかハードルが高いものですが、今回は階層的生物ナビ学からの海外派遣支援により貴重な機会をいただきました。この場を借りて、お礼申し上げます。ありがとうございました。

図１．会場の様子.

図２．バーク自然史文化博物館に収蔵されている鳥類の博物標本．ずらーっと並んだ棚に丁寧にラベルが張られ、整理・管理されている（写真：小澤光莉）.

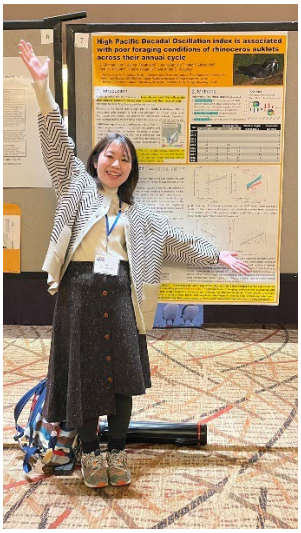


図３．執筆者のポスターセッション終了後の様子。声も枯れ切って、少し疲れている.

国際研究活動報告：

太平洋海鳥集会(PSG2024)への参加報告

武田　航

名古屋大学大学院・環境学研究科・D2

私は、2 月 21 日から 23 日までシアトルで開催された国際学会、PSG2024 に参加してきました。この学会では、太平洋に生息する海鳥を対象にした研究が分野を問わず発表されており、多くの議論がなされています。この学会にて、私は「行動間の相関関係とつがい内における行動の類似性」について、口頭発表を行いました。今回は、この学会への参加で得たものや感想、そしてシアトルでの思い出について少しばかりお話ししたいと思います。

まず初めに、私が行っている研究について軽く紹介させてください。私は、粟島に生息するオオミズナギドリを対象に、行動の個体差に注目した研究を行っています。同じ生息地に生息する同種内において、どのような行動の個体差が見られるのか。そしてそのような個体差はどんな機能を果たしており、どうして個体差が維持されるのか。そんな疑問を明らかにするために、私は繁殖地上における個体の行動を記録したり、バイオロギングを用いて海洋上での行動を記録したりしています。動物にはさまざまな行動の個体差が見られるのですが、私はその中でも、時間的・環境的に一貫した行動の個体差である、「動物の個性」に興味を持っています。しかしながら、野生の海鳥を対象に動物の個性を研究している人は、日本ではほとんどいません。そこで私は、新たな出会いと知見を得るため、個性研究が盛んに行われているアメリカのシアトルで開催される本学会への参加を決めました。

2 月のシアトルということで、ある程度の防寒対策をして臨んだのですが、実のところそこまで寒くなく、東京と同じくらいだったような気がします。ただ、海に近い街であるため、風が強かったり雨が多かったりと、いささかの過ごしにくさは感じました。そんなシアトルを少しばかり観光したあと、いよいよ学会の始まりです。会場は Grand Hyatt Seattle という、シアトルのダウンタウンに位置するホテルでした。ホテル内の 3 つのホールで口頭発表が、ホールをつなぐ廊下でポスター発表が行われ、その休憩時間にはコーヒーやブラウニーなどの軽食をつまむことができます。私はシアトルの物価高に負け、その軽食だけで昼食を済ませることもありました。また、会場内ではたくさんの海鳥グッズが販売されており、私は puffin の描かれたキャップを購入しました。

口頭発表会場の様子

PSG では、太平洋に生息する多様な海鳥を対象にした研究の発表が行われます。他の参加者の発表を聞いて、とにかく海鳥が大好きな方が多いなあと思いました。この海鳥が好きだからこんな研究をした、この海鳥が好きだからこんなプロジェクトを立ち上げたなど、海鳥の保全を目指した研究が多かった印象です。

私の発表は学会の 1 日目の午後でした。初めての国際学会での発表ではありましたが、しっかりと準備をしていたためか、思いの外緊張することなく発表することができました。しかし、準備は万全であったにもかかわらず、発表中に動画が動かないというアクシデントが！その動画は、オオミズナギドリの繁殖地内での行動を撮影したものであり、この動画を使ってオオミズナギドリがどんな海鳥なのか紹介する予定でした。そこで私が咄嗟に口にした言葉は、「They are a little stupid.」です。陸地では鈍臭いオオミズナギドリを表現したくて口からこぼれたこの言葉で、聴衆の方が笑ってくれたため、結果的にビデオが動かなくて良かったのかなと、今になって思います。そんなちょっとした事件もありながら、私の発表は無事に？終わりました。

学会参加中には、国内外の研究者と多く出会うことが出来ました。中でも一番記憶に残っているのは、台湾でオオミズナギドリを研究している研究者たちとの出会いです。オオミズナギドリという共通言語があることから簡単に打ち解けることができ、学会中は彼らと多くの議論を交わし、そしてたまにはたわいの無い話をし、良い関係を築くことが出来ました。また、同じく個性研究を行っている研究者と議論を交わすことができ、実験の難しさや、実験をする際に注意している点について話し合うことができました。

学会終了後の翌日には、学会主催の Field Trip が開催され、シアトル内湾に生息する海鳥をフェリーに乗って観察しに行きました。そこで幸運だったのが、本来は見られることのないシャチが観察されたことです。シャチの群れの迫力ある姿に、僕のシャッターを押す手は止まりませんでした。

Field Trip で撮影したシャチの群れ

初めての国際学会に単身で乗り込んだ今回の体験は、私にとって非常に実り多い経験になったと思います。海外で多くの研究者がたくさんの面白い研究を行なっていること、そしてそんな彼らが自分の研究を面白いと誉めてくれたこと。この経験は、小さな島国で形成された私のマインドを大きく変えてくれました。そして、私の中にもともとあった世界に出たいという欲望がさらに強くなりました。

最後に、今回の学会参加は階層的生物ナビ学からのご支援を受けました。ご支援のおかげで、非常に貴重な経験をさせていただきました。ありがとうございました。

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. 5（2024 年 4 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