

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.2
2022年8月

目次

領域代表挨拶	p.3
公募研究（第1期）の紹介	p.5
研究成果紹介（高橋班，依田班）	p.21
勉強会参加報告	p.28
領域イベント（フィジカルイベント）報告	p.36
国際活動報告（藤井班，飛龍班）	p.37
体験記：異分野弟子入り（飛龍班）	p.42

公募班をお迎えして:

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)】が採択されました。

移動を中心とした個体レベルの活動を「ナビゲーション」、他の個体や環境と影響し合う活動を「インタラクション」、そして個と集団が階層性を持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。

階層ナビの本質的構成要素の連動や因果関係を「行動ダイアグラム」と名付け、その解明に切り込む研究プラットフォームが「χ (Chi: カイ) ログボット」です。ChiはCuriosity/Causality-driven and Highly-Intelligentのacronymで、介入のカイでもあります。AIを用いて行動の計測と介入を自律的に制御し、階層ナビ実験の自動化を目指して開発するロボットです。

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。これはAIが収集したデータから因果関係を分析・学習し、行動ダイアグラムの仮説を検証・強化するための実験介入

方法を自ら決定するという点が大きな特徴です。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洗練させる枠組みです。

この領域の計画班はA01フィジカル班(依田、飛龍、高橋、西森)とA02サイバー班(橋本、前川、藤井、牧野、川嶋)で構成され、2021年11月に発足しました(Newspaper Vol.1, 2022.1)。12月8日にキックオフシンポ(オンライン)、毎月の勉強会(オンライン)、そして、2022年7月5日には計画班代表・分担の研究発表会フィジカルイベント(待望の対面ミーティング!)を実施しました。オンライン会議では面識のあるメンバーに、はじめまして?などと、おとぼけもありましたが、リアルでは会話がはずみ、いろいろなアイデアがうまれました。試作実験装置のデモなどもあり、とても盛り上がりました。そのレポートはこの号のNewsletterに掲載されると思います。

6月に公募班16チームが加わり、フィジカル研究の対象が広がり(ホタテ、ハチ、ウマ、スナメリ、イルカ、ハエ、クマ、カメ、オオサンショウウオ・・・)

、CPS手法の厚みが増しました（非線形ICA、群による群制御、ロボット引率・・・）。行動ダイアグラム解明のためのチーム連携がこの領域の特徴ですので、計画班から公募班に積極的にアプローチして、共同研究のきっかけを探しました。

そして迎えた7月28日第1回領域会議（オンライン）、コロナ第7波で隔離中のメンバーやビデオ参加のメンバーもいましたが、無事に全員がプレゼンをすることができ、充実した会合でした。すでにくつもの共同研究がスタートしており、χログボットを装着した写真なども見せていただき、驚くとともに大変うれしく思いました。公募班のみなさまには、準備期間が短いなかでもコンパクトでわかりやすい説明をまとめてくださり、ありがとうございました。

アドバイザーを荒井修亮先生（水産大学校）、小林亮先生（広大名誉教授）、有村博紀先生（北大）にお引き受けいただきました。お忙しい中、長時間の領域会議にご出席くださり、激励のコメントを頂戴しました。多様な研究対象とツールをもつ研究者がまとまって議論することの重要性を再確認したところです。これからもご指導をよろしくお願いいたします。

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。



公募研究 A01 フィジカル班:

閉鎖系に棲む動物の被食回避行動 : 両生類幼生をモデルとした実験生態学



岸田 治

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授

捕食者や餌など動物の生存を左右する要因は、その密度や状態が、年や季節、場所によって大きく変化します。不都合が生じたときに動物たちは様々な手段で対処します。鳥類の多くは季節とともに渡りをし生息域を変えますし、大海原を泳ぐ魚やサバンナにすむ哺乳動物は適地を求めて常に移動しています。つまり、開放系にすみ移動能力の高い動物たちは、生息場所を変えることで不都合から逃れることができます。一方、朽木のなかにすむ昆虫や、池沼にすむ魚、両生類幼生のように、閉鎖系にすむ動物は、不都合に直面してもその場から離れることはできません。彼らはいかにして不都合な条件を生き抜くのでしょうか？

池にすむ両生類の幼生は、閉鎖系にすむ動物の代表格として注目され、以前から条件依存戦術について研究されてきました。例えば、捕食者の在・不在でオタマジャクシの行動を比較した研究では、オタマジャクシが捕食者がいる場合に、じっとして動かなくなったり、物陰に隠れることが確かめられてきました。これらの行動は、観察のしやすさや群集への波及効果の重要性から他の分類群でもよく調べられ、閉鎖系にすむ動物の一般的な防御行動として知られるようになって

います。しかし危機に直面した動物の行動は、もっと巧妙で多様なはずで。また、捕食者に対して防御形態を発現するような種では、形態に関連した行動パターンも見られると期待されます。

そこで本研究では、閉鎖系にすむ動物の条件依存的な行動の多様性を明らかにすべく、両生類幼生を対象とした操作実験研究を展開します。食う-食われるの関係のさまざまなシナリオを水槽に再現し、個体の行動を動画に記録します。動画の分析を、卓越した解析技術を誇るサイバー班と協同で行うことで、両生類幼生の未知の行動様式の解明を目指します。



図 1. 高密度ですむエゾサンショウウオの幼生。共食い避けるどんな行動をとるのだろうか

公募研究 A01 フィジカル班:

小脳活動の光計測と操作による 小型魚類の階層ナビゲーションの理解



津田 佐知子

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

動物は様々な集団行動をなしており、多くの種が群れを形成しながら移動することが知られます。なかでも、顕著な群れ行動が知られる魚類においては、大型回遊魚に加え、モデル生物として広く使用される、ゼブラフィッシュやメダカといった小型魚類においても群れ行動が明らかとなっています。このような魚類における群れの構造はどのような内的・外的要因のもと形成されるのでしょうか。本研究では、小型魚類ゼブラフィッシュに注目し、群れ行動のパターンがどのように形成され、変化するのか、その実態の詳細を明ら

かにします。さらに、群れのパターンが、個体の内部状態（神経基盤）、そして発達期の環境といった外的要因により、どのように規定されるのか、その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、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社会性の改善、回遊生物の環境保全、漁業などの社会応用への可能性も目指していきます。

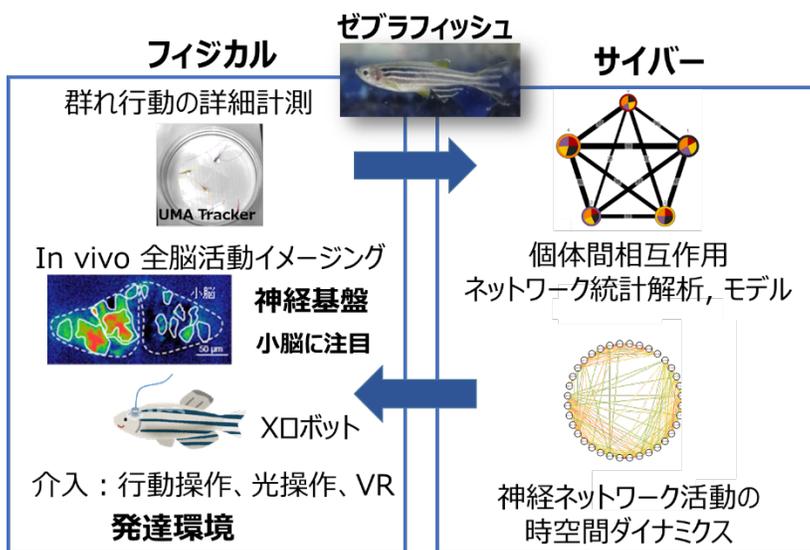
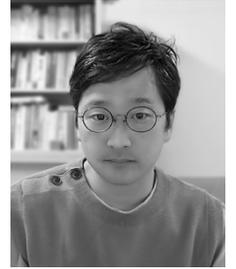


図1 群れにおける階層ナビゲーション機構についてのゼブラフィッシュを用いたアプローチ

公募研究 A01 フィジカル班:

個体の不均一性がもたらす集団行動の 多機能性: 集団行動の高次遺伝基盤と制御



高橋佑磨

千葉大学大学院理学研究院・准教授

動物は集合して行動することで、さまざまな利益を得ている。このとき、生物集団を構成する各主体には、必ずと言っていいほど、選好性や意思決定、行動パターン、運動能力に変異がある。いわゆる「個性」である。個性は、遺伝的な場合もあれば、環境に依存して決定するものもあるかもしれない。ただし、いずれの場合も、このような個体間変異は、非相加的に集団レベルのパフォーマンスを向上（シナジー効果）、あるいは低下（アナジー効果）させる可能性がある。しかし、集団内の多様性を明示的に考慮して、群れの動態や集団的知性を実証的に検証した研究は稀である。また、どのような形質・特性・遺伝子の多様性が、これらの非相加的な効果を生み出すのかは、まったくわかっていない。

私の研究室では、現在、ショウジョウバエのいくつかの種について、多数の系統を維持している。これらの系統では、さまざまな形質について、遺伝的な変異が存在することがわかっている。キイロショウジョウバエについては、各系統のゲノム配列が利用可能である。そこで私たちは、ショウジョウバエ類を用いて、

集団内の個体の組成を実験的に操作し、表現型多様性が群れの構造（個体間距離など）や群れレベルの行動パターンや機能（探索効率、採餌・捕食回避効率、問題解決能力、集団的知性）に与える影響を明らかにするとともに、ゲノム解析とトレイトミクス解析を通じて、集団行動の遺伝基盤や形質基盤（どの遺伝子／形質の多様性が集団行動と関与しているか？）を解明する。これらの成果をもとに、多様性を操作することによる集団行動パターンの制御を目指す。

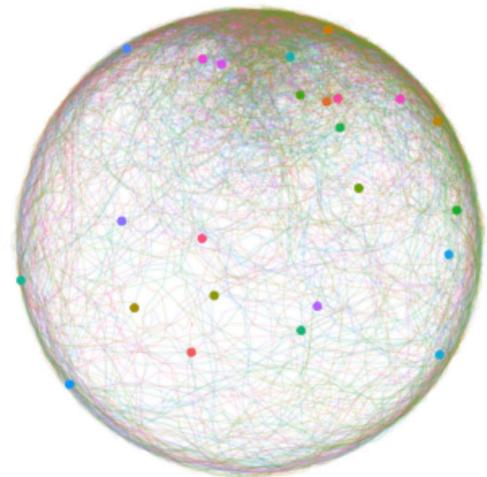


図 オープンアリーナ実験による群れ構造の評価

公募研究 A01 フィジカル班:

海を回遊するアカウミガメの 多次元感覚による階層ナビゲーションの理解



坂本 健太郎

東京大学・大気海洋研究所・准教授

海洋を生活の基盤とする動物には、渡りや回遊といった形で大規模な移動を行う種が多いですが、その中でもアカウミガメは最も大規模な移動を行う動物の一つです。北部太平洋に生息するアカウミガメ個体群は日本沿岸の沖縄から千葉にかけての砂浜で繁殖します。その後、ふ化した幼体は日本沿岸からアメリカにかけて太平洋上を広く回遊しながら成長します（図1）。性成熟に至った個体は再び日本沿岸の繁殖地に戻り、産卵を行います。生活史の中で、これほど広い空間を移動するという事実は、アカウミガメに巧妙なナビゲーション機構が備わっていることを示唆していますが、その実態についてはほとんど解明されていません。

広い海を回遊するアカウミガメは、移動スケールに応じた階層的なナビゲーション機構によって、移動の意思決定を行っていると考えられています。大規模移動スケールでの地磁気感知ナビゲーション機構や小規模移動スケールでの餌獲得ナビゲーション機構が仮説として提案されてきましたが、自然環境下での仮説検

証には至っていません。本研究では、装着型Xログボットや新規に開発する装置を用いることで、ウミガメのナビゲーションに係る行動を精密に計測するとともに、人為的に行動に介入し、ナビゲーション機構に関するメカニズムの因果関係を明らかにします。さらに医薬品投与によって動物の内的状態を変化させ、生理状態と階層ナビゲーション機構の対応関係を調べます。

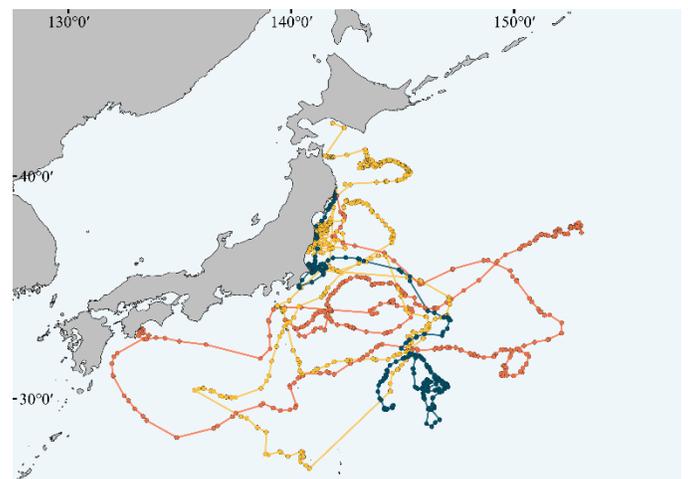


図1 三陸沿岸から放流したアカウミガメの回遊経路

公募研究 A01 フィジカル班:

CPS における個体差を考慮した 単独性動物の個体—個体群間の 行動階層性の解明



小池 伸介

東京農工大学大学院・教授

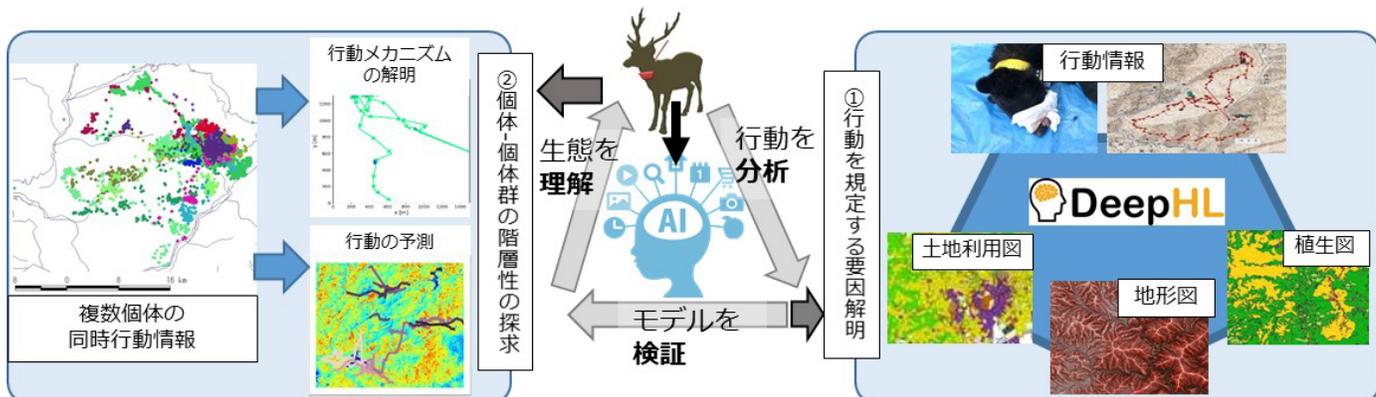
私たちは、Cyber Physical System (CPS) を用いることで、個体差を考慮して動物の行動を起因する要因とそれらの関係や、行動ダイアグラムを介した個体—個体群間の階層性の解明を目的としています。

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、A02 サイバー班と共同して明らかにします。ツキノワグマは非常に広い生息地で生活し、様々な景観構造を利用することから、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。さらに、単独性の動物であるため、個体間の行動の同調性に対する他個体の存在の影響を評価せずに、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。さらに、単独性のクマであっても、季節的な移動の変化はほぼ同時に観察されることから、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も目指します。

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．本研究の概略。①において、内的要因を考慮したうえで、個体レベルの行動を起因する外的要因としての景観構造の行動への影響の検証を行う。②において、個体群を構成する各個体同士の行動を同期させるトリガーの解明を行う。



公募研究 A01 フィジカル班:

群れ形質の多様化をもたらす個体の行動特性とその神経制御メカニズム



田中 良弥

名古屋大学・理学部・助教

群れの形成は動物に広く見られる重要な生存戦略であり、群れ形質の多様化は動物種ごとの生活史や環境適応を実現するために大きな役割を果たします。群れ形成は個体の行動が原動力となるため、その多様化には個体の行動特性の進化とそれを支える分子・神経機構が存在すると考えられますが、その理解は進んでいません。私たちは最近、ショウジョウバエ科昆虫の種間で群れ形質に大きな多様性があることを見出しました。本研究では、ショウジョウバエ科昆虫に注目することで、群れ形質の多様化が『個体の行動特性のどのような種間の違いによるか?』や『それが脳神経系や遺伝子のどのような働きで生じるか?』という問題に挑みます。この目的を達成するために、群れ形質の異なるショウジョウバエ種間において、群れを作る過程の個体間の相互作用をサイバー班と共同して分析します。これにより、群れ形質に関与する個体の振る舞い・行動特性を明らかにします。次に、明らかにした個体の行動特性を制御する遺伝子・神経基盤を探索します。神経行動学の実験モデル種であるキロショウジョウバエを用いることで、多くの遺伝子や神経回路を標的にスクリーニングを行うことが可能です。さら

に、遺伝子や神経回路を操作した時の行動をサイバー班と共同して分析することで、群れ形質を規定する因子を特定できると期待しています。こうした取り組みを通して、動物の群れ形質の多様化を生み出す階層ナビゲーションを生物学・情報学の視点から理解することを目指します。

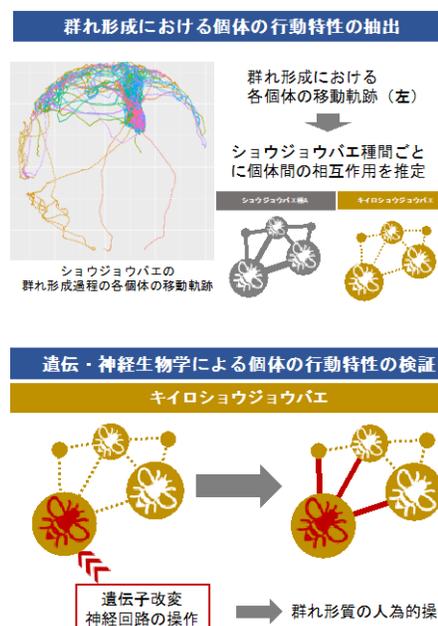


図 1 (上段) ショウジョウバエの群れ形成における各個体の移動軌跡を元に、個体間の相互作用をサイバー班と共同して分析する。(下段) 遺伝学・神経回路の操作により、群れ形質の人為操作を行う。これにより、群れ形質を制御する因子を特定する。

公募研究 A01 フィジカル班:

バイモーダルな感覚器官を使い分ける イルカの共同採餌行動



森坂 匡通

三重大学・大学院生物資源学研究科附属鯨類研究センター・准教授

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、まず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、イルカの感覚器官（エコーロケーションと視覚）の使い分けについての飼育下での詳細な研究を行います。目の動きと音を同時記録できるシステムを作成し、イルカが捕食を含む様々な行動を行うときの感覚器官の使い分けを記録します。

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捕食行動の行動学的記載を行います。ドローンを用いて、野生カマイルカが群集性魚類を共同で採餌する様子を撮影し、捕食者であるイルカの行

動を詳細に研究し、どのように「共同で」採餌を行うのかを明らかにしていきます。



図 1 イルカが群集性魚類を共同で採餌することをどのように実現させているのかに迫るため、野生カマイルカの共同採餌をドローンで研究することと、飼育下のイルカの視覚とエコーロケーションというバイモーダルな感覚器官をどのように使い分けているのかを明らかにすることの2つの方向から研究を行います。

公募研究 A01 フィジカル班:

日本沿岸に生息する小型鯨類スナメリの移動行動と船舶が与える影響に関する研究



木村 里子

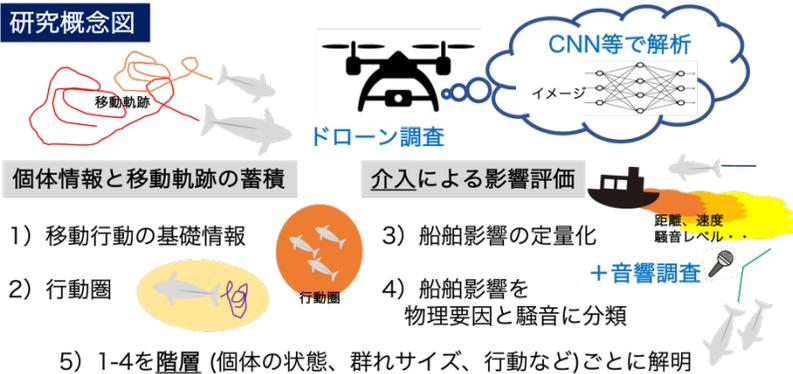
京都大学・東南アジア地域研究研究所・准教授

海洋生物の移動の最たるものとしてヒゲクジラ類の回遊などはよく知られていますが、同じ鯨類でも小型鯨類（イルカ類）の移動行動についてはあまりよくわかっていません。小型鯨類の中でも、特に沿岸定住性が強い種については、船舶航行や海洋開発等の人為的攪乱の影響を大きく受けるため、行動や生態について情報を取得し、影響を軽減させるなどの対策が必要です。

スナメリは、日本近海で最も沿岸性の高い小型鯨類で、生息域への固執が強い絶滅危惧種です。しかし、どのくらいの距離を移動するのか？など、スナメリの移動行動についてはほとんど何も定量的にわかっていませんでした。そこで、本研究では、複数の海域で上

空からドローン調査を実施し、非侵襲的に長時間、多量のスナメリの位置情報と動画を得、解析に機械学習技術を適用して水面に浮上する水圏大型生物のドローン研究手法確立に挑みます。これによりスナメリの様々な個体状態、群れサイズ、行動など（階層的生物ナビ学における「階層」）における移動行動を調べ、行動圏などを定量化したいと考えています。沿岸における人為的攪乱として船舶航行を「介入」と捉え、ドローン調査と受動的音響調査を実施することで船舶航行の物理的要因と騒音の影響を区別して、階層ごとの影響を評価します。本研究を通じて、スナメリと船舶について、「安全距離」や「安全速度」などの具体的な保全策提言に貢献したいです。

研究概念図



目的：スナメリの移動行動と船舶影響を定量化
小型鯨類のドローン観察手法の確立と具体的な保全策に貢献

図1. ドローン調査によりスナメリの移動行動定量化に試みます。船舶航行による影響評価では、スナメリの群れサイズや行動によってどのくらい影響が異なるかを明らかにします。ドローン調査と音響調査を組み合わせることで、物理的要因と騒音のどちらがどの程度影響を与えるかについて、解明に挑みます。

公募研究 A01 フィジカル班:

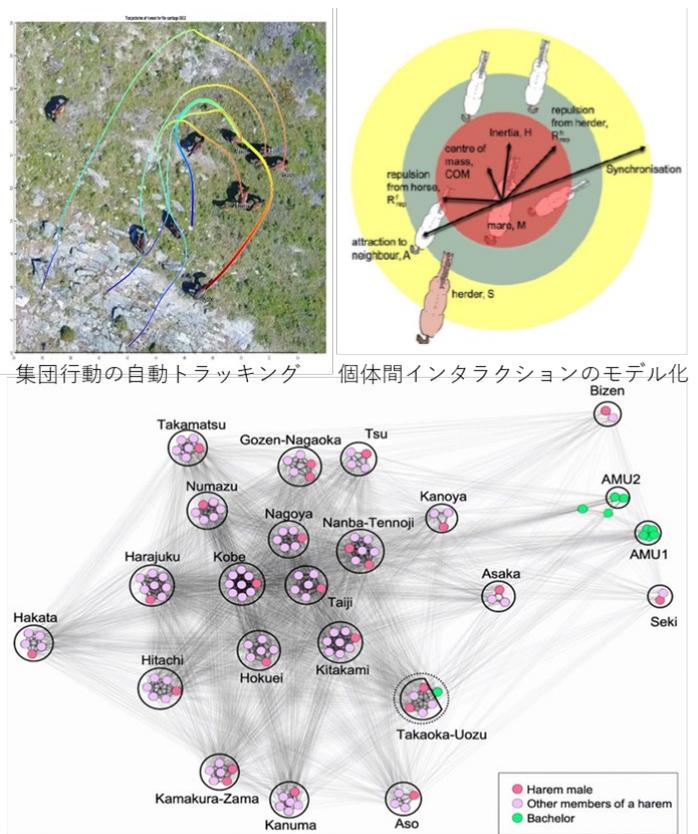
野生ウマの重層社会における 群内および群間の階層的インタラクション



山本 真也

京都大学・高等研究院・准教授

社会が複雑化したとき、群れ・個体の挙動や機能はどのように変わるのだろうか？本研究では、重層社会における集団行動のメカニズムを、ドローンで収集した野生ウマ集団の位置および動きのデータを基に数理モデルを構築し解明する。動物の集団行動に関するこれまでの研究は、魚や鳥などの比較的単純な単層社会を対象におこなわれてきた。あくまで、ひとつの群の中でおこる個体間相互作用である。それに対して、重層社会では、複数の群れが集まって高次の集団が形成され、「群れ外だけど集団内」という他者との協調関係が生まれる。群内と群間の階層的なインタラクションを考慮しないとイケない。私たちは、野生ウマ集団の全個体（約 20 群・100 頭以上）の個体識別に成功し、重層社会の存在を発見した。ドローンを用いたデータ収集方法を独自に開発し、集団全体の個体配置・動きのデータを 2016 年から継続的に収集している。本研究では、これらのデータを用いて、①重層社会における個体間・群間に働く力学を拡張型 Attraction-Repulsion Model で表現し、②行動や移動方向が個体間および群間でどのように伝播・同期するのかを解明する。



ウマ社会の重層構造：群内・群間の個体配置による社会ネットワーク

図 1 ドローンを用いて、動きの自動トラッキング・インタラクションのモデル化・重層構造の解明をおこなってきた。これらを組み合わせ、ウマの重層社会における群内・群間の階層的インタラクションを明らかにする。100 頭を超える大型哺乳類の集団における集団行動・集団意思決定のメカニズムの解明を目指す。

公募研究 A01 フィジカル班:

環境・身体ダイナミクスの階層的变化に対する昆虫ナビゲーション戦略の解明とモデル化



志垣 俊介

大阪大学・基礎工学研究科・助教

生物、特に昆虫は小規模な神経系であるために限られた計算資源しか持ち合わせていないにもかかわらず、無限の変化を示す実世界環境に対して、実時間かつしなやかに対処することができます。これは、昆虫が身体を通して外界の物理的・化学的特性を把握・活用することで適応的に行動を選択しているからだと考えられます。つまり、脳神経系・身体・環境という3者間の密な相互作用を活用しているからに他なりません。この3者間の関係性を維持することで適応性が生み出されているのであれば、介入しやすい身体もしくは環境のダイナミクスを意図的に変容させることで、昆虫に内在する適応性を炙り出したいと考えてい

ます(図1)。

本研究は、雌が発する性フェロモンに対して定位行動を発現するカイコガ雄成虫を題材に、「Animal-in-the-Loop」と呼ぶ独自の実験系の枠組みを用いて昆虫の感覚入力と行動出力の関係を網羅的に計測します。また、得られた感覚入力と行動出力の連関データに対して、AI的解析手法を導入することで「何故、環境と身体が大きく変化しても目的地に到達できたのか?」という背景に肉迫します。最終的には、人工的なナビゲーションアルゴリズムに落とし込み、実機実装することで、昆虫の持つ適応的なナビゲーションアルゴリズムを実世界へと展開することを目指します。



図1: 研究構想. 図上段は本研究で用いる Animal-in-the-loop (AIL)システムの概要図です. AILは昆虫がエージェントを遠隔操作するシステムで、昆虫のナビゲーション中の感覚入力と行動出力の関係を高精度に獲得できます. エージェントの環境と身体ダイナミクスを図下段のように階層的に大きくしていくことで、頑健かつ適応的な昆虫のナビゲーション戦略の紐解きに挑戦します。

公募研究 A01 フィジカル班:

群れ形成によるホタテガイの 集団防衛戦略の解明



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* は我が国の水産重要種であり、その半数以上が北海道で水揚げされています。一般的にホタテガイは浮遊幼生期を経て着底した後は、自由遊泳によって捕食者を回避しながら個々が単独で生活することが知られています。そんなホタテガイが、約 30 万個体に及ぶ集団を形成し、捕食者の接近に連鎖的に回避行動を示すことが北海道知床半島沿岸で近年初めて報告されました。

このホタテガイの「群れ」は数カ月以上継続する一方で、当該海域はヒトデなど様々な捕食者が高密度に生息しています。そのため、ホタテガイの長期的な群れ形成は捕食者への何らかの防衛（回避）機能を有すると考えられますが、そのメカニズムなどは全く未解明です。そこで、本研究では、①ホタテガイの回避行動の抽出によって、単独生活と群れ生活の回避戦略の差を明らかにし、②捕食者の種類や密度などの変化によるホタテガイの群れ構造の変化を明らかにしたいと考えています。また、領域の皆様のご協力を得なが

ら、単独生活および群れ生活それぞれの回避戦略と生存率の関係を検証し、集団防衛戦略としての群れの形成条件の解明につなげたいと思います。

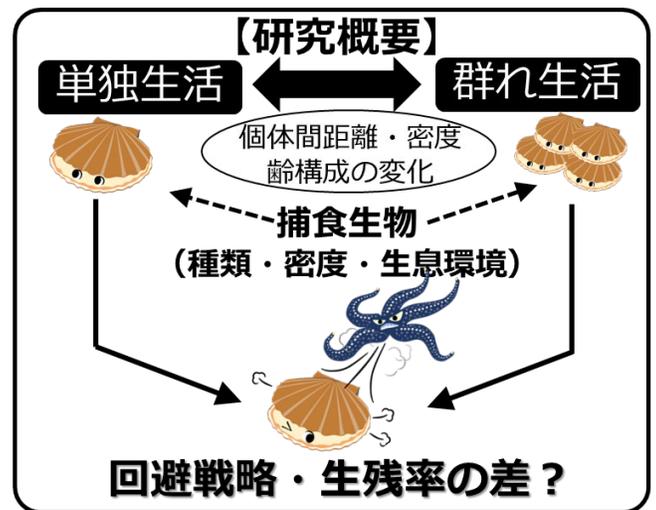


図1 ホタテガイの群れと回避行動の様子（上）
および本研究の概要

※写真はNHK「ダーウィンが来た！」公式 Twitter より

公募研究 A02 サイバー班:

群れの3次元行動計測のための 全自動マーカースレスモーションキャプチャ



延原 章平

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

ひとの集団あるいは動物・昆虫・魚などの群れに見られる個体間もしくは環境とのインタラクションや、その個体と集団が階層性をもって移動する階層ナビゲーションを定量的にモデル化し、解析・予測へとつなげるためには、各個体を拘束することなく3次元移動軌跡を自動計測する技術の確立が不可欠です。しかしこれまでの複数カメラによるマーカースレスモーションキャプチャ手法ではカメラ群の相対姿勢を事前に求めるキャリブレーション作業が必要であり、かつその作業には熟練の技術が必要とされてきました。

本研究では、カメラ群を全自動でキャリブレーションする技術を新たに開発することで、カメラを設置するだけで実行可能なマーカースレスモーションキャプチャの実現を目指します。これにより、生物学など非コンピュータビジョン分野の研究者であっても、実環境で手軽に実行可能なマーカースレスモーションキャプチャを実現し、階層的生物ナビゲーション研究の進展に貢献したいと考えています。

具体的には、ある群れを複数の方向から観測した映像を入力として、①カメラ間の相対位置姿勢という空

間的キャリブレーション、②カメラ間での撮影時刻差という時間的キャリブレーション、③個体間の見た目の変化が乏しい状況での個体識別とカメラ間での同定、という3つの課題を同時に解くアルゴリズムを開発します。

図1はこれまでに行ってきた撮影人物自身を使った空間的キャリブレーションを表しており、カメラ配置を得ると同時に、単眼カメラ映像から人物3次元姿勢を推論する学習モデルも自動的に得ています。本研究ではこの技術を発展させて、互いに見分けをつけることが難しいような複数個体が存在している状況においても自動的にカメラ姿勢を得ると同時に、単眼カメラから被写体となった生物の3次元姿勢も得ることができモデルの開発を目指します。



図1: 人物の動きを用いた自動カメラキャリブレーションによるマーカースレスモーションキャプチャ

公募研究 A02 サイバー班:

数学の群に基づく生物の群行動のデータ解析とメカニズム解明および工学応用



櫻間 一徳

京都大学・情報学研究科・准教授

生物は群れで行動することで、個体ではなし得ない高度な群行動を発現させます。例えば、渡り鳥が群れをなして長距離先の目的地まで到達する、アリが行列をなして離れている場所から採餌するなどがあります。このような高度な群行動は、生物個体の持つ機能を協調することで発現します。個体の持つどのような機能がどのように協調することで高度な群行動が発現するのか、そのメカニズムの解明は生物学における重要な研究課題です。さらに、生物に基づく技術開発の観点から、工学的にも重要な課題です。

本研究では、この研究課題を解決するため、生物の高度な群行動の発現メカニズムを包括的に理解できる数理モデルを構築するモデリング技術を開発します。さらに、本技術を通じて実世界の様々な生物の行動データからモデルを構築することで、生物の群行動の根源的な発現メカニズムを解明します。最後に、生物の機能を工学技術（避難誘導・車両やドローンの群制御など）に活かす方法を検討します。

本研究のアプローチは、生物の群れの行動データから、ニューラルネットワーク (NN) によってモデル関数を推定し、その関数の不変性を導出することで、

個体を持つ機能を特定します (図 1 参照)。このアプローチは、これまで開発してきた群ロボットの分散協調制御の基礎理論に基づいています。この理論から、ロボットがセンサ (カメラ、コンパス、GPS など) で得る測定情報を数学の「群」によって表現したとき、達成可能な協調動作が群作用に不変なモデル関数として特徴付けられます。この理論を逆に使うと、生物の群行動を表すモデル関数の不変性から、個体の持つ機能を特定することが可能となります。

このように、本研究では、「生物の群」と「数学の群」という異分野における概念である「群」を結びつけることで生物の群行動のメカニズムを解明するという、ユニークなアプローチを確立します。

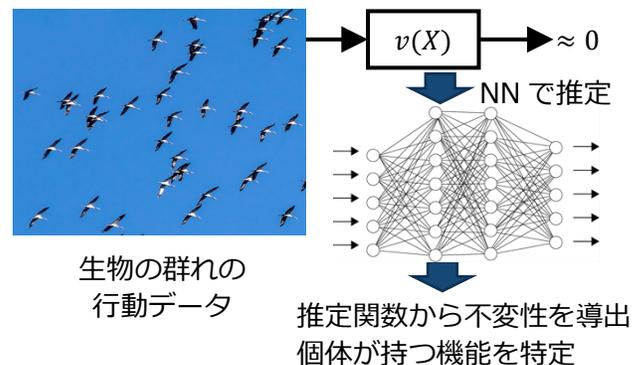


図 1 近似関数の不変性に基づくアプローチ

公募研究 A02 サイバー班:

ミツバチからひも解く経路積算型ナビゲーションの柔軟性と堅牢性



佐倉 緑

神戸大学・理学研究科・准教授

多くの昆虫は、方向と距離をリアルタイムにモニターしながら移動する、いわゆる「経路積算」とよばれるナビゲーションを得意としています。ミツバチは経路積算に必要な「方向」と「距離」の情報をそれぞれ「天空の偏光パターン」と「移動中に受容するオプティックフロー」から検出しています。これまで私たちは、図1に示すような野外での採餌訓練とフライトシミュレータを使った飛行軌跡を併用するシステムで、ミツバチに任意の方向に位置する餌場を学習させ、その個体の飛行軌跡と様々な刺激に対する反応を解析できるシステムを開発してきました。

多くの場合、個体は一度に複数の餌場を記憶しますが、これらの複数の記憶からどのように自らの目的地を選択するのでしょうか。おそらく、その時々々の餌場の状況や信頼度によって、最適な目的地を判断した上で、その目的地へのナビゲーション行動を発現すると考えられます。このしくみを明らかにするため、複数の別々の場所に存在する餌場を学習・想起させるパラダイムを新たに確立します。ある目的地に向かう途中で、別の記憶を想起させるような介入を行うことで、複数の記憶がどのように相互作用し、目的地選択に関わるのかを明らかにしたいと考えています。

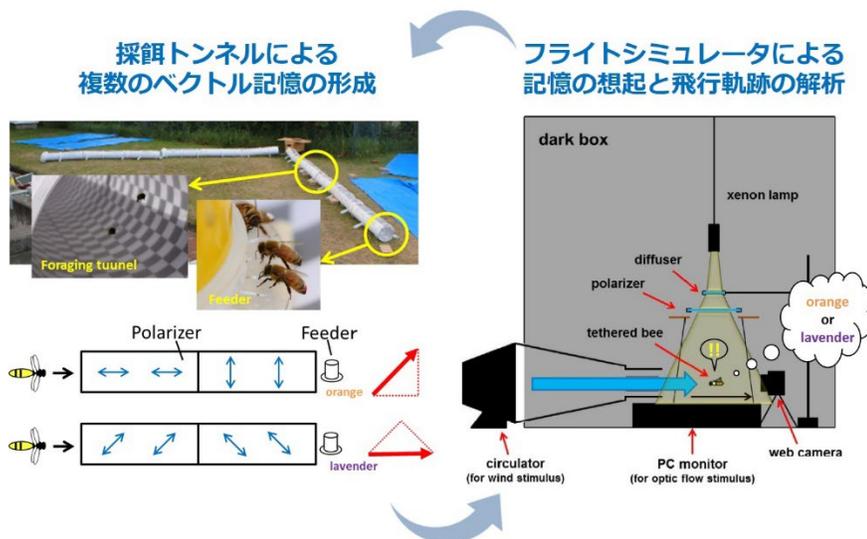


図1 実験パラダイムの概略図。天井に偏光板を配置したトンネルを使った採餌訓練（左上）によって、異なる方向にある2種類の餌場を学習させた後、フライトシミュレータでナビゲーション軌跡を記録します（右）。それぞれの餌場に、記憶を想起させるための異なる匂いをつけておくと（左下）、その匂いによって、それぞれの記憶を想起させることができるのではないかと考えています。片方の記憶を想起して、その方向へ向かっている個体に対して、もう片方の記憶を想起させる介入実験を行います。介入が軌跡に与える影響を解析することで、複数の記憶の相互作用とその時間変化に迫ることを目指します。

公募研究 A02 サイバー班:

非線形階層表現学習による 集団ナビゲーション数理構造の解明



森岡 博史

理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員

本研究は生物の集団移動（ナビゲーション）の背後にある複雑な階層的メカニズムの情報科学的な解明を目的とします。生物の集団移動は様々なスケールの生物群において観測され、それにより実現される集団としての行動原理はときに現代技術でも実現困難なほど高度なものとなります。そのような生物集団のもつ階層的ナビゲーション機能の数理的なメカニズムが解明できれば、将来的に様々な工学的応用が可能となり、大きなブレークスルーになると期待されます。

そのために本研究では、代表者らが近年開発した深層学習に基づく先端的な非線形独立成分分析理論（ICA; 図 1A）をさらに発展させることで、新たな教師なし階層表現学習法を開発し、生物集団移動から観

測される時系列データからの、その背後にある階層的な非線形ダイナミクスと、それを制御している潜在因子と集団価値関数、それらの間の因果構造の、データ駆動的な推定を目指します（図 1B）。生物集団行動のモデル化はこれまでも様々な試みが行われてきましたが、その次元の高さや階層性、強い非線形性に加え、観測できない未知の構成要素の存在などにより、そのモデル化は困難でした。本研究はそのような困難に対し、まったく新しい理論的背景と深層学習に基づく階層的表現学習法を開発し、背後にある未知の構成要素を陽に考慮し同定・推定することで挑戦するものであり、様々な生物が見せる集団ナビゲーションの数理構造の解明を目指すものとなります。

A 非線形独立成分分析 (ICA) B 本プロジェクト(非線形階層表現学習)

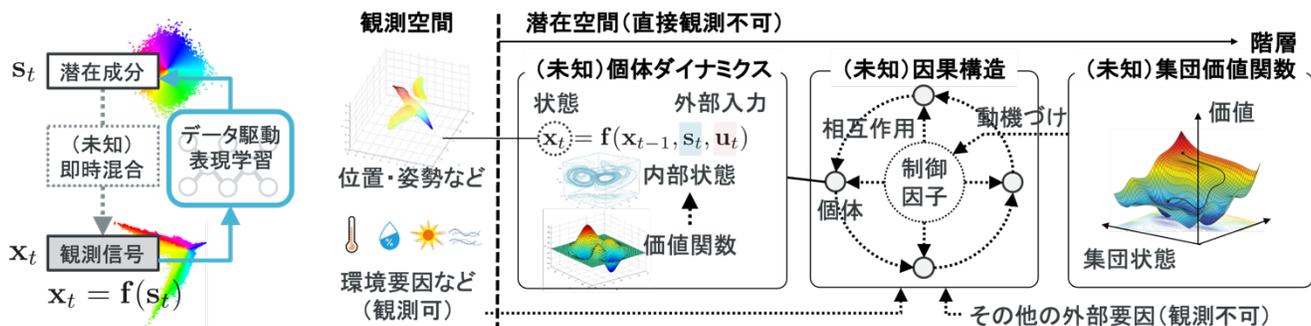


図 1 A 非線形独立成分分析 (ICA) と、B 新たに提案する非線形階層表現学習によるデータ駆動推定

公募研究 A02 サイバー班:

生物ナビゲーションにインスパイアされた、 ロボットの群衆ナビゲーション



佐竹 聡

国際電気通信基礎技術研究所・深層インタラクション総合研究所・研究員

少子高齢化が進む我が国において、人々の代わりに環境を動き回りながらサービスを提供するロボットの実現が期待されています。店員や警備員といった人々の仕事をロボットが代替するためには、ロボットが人々（グループ、群れ）を誘導する群衆ナビゲーション技術が必用不可欠です。

しかし、ロボットによる人々のグループの誘導は、簡単にはいきません。単に、人とロボットを同じグループとして移動させただけでも、人の移動方向や速度にロボットが対応できず、人の移動の邪魔になってしまいます。この問題を解決するには、人々のグループ（群れ）の一員として移動しつつ、人々を誘導するメカニズムを解明しなければなりません。

上記課題を解決するため、本研究では、人々のグループ（群れ）を制御する方法として、生物の群れのナビゲーション方法の利用を試みます。実際、鳥の群れの移動でも利用されている Leader-Follower の関係が、人同士のグループの移動でも利用可能であることが予備調査で明らかになってきました。そこで、このアイデアの拡張を進めます。例えば、牧羊犬による羊の誘導といった、異種間の群れ間で生じるインタラ

クション方法を参考にしながら、人のグループを誘導する群衆ナビゲーションのモデル化を進めます。この際、環境に設置したセンサネットワークを利用して、人々の位置を計測し、その動きを再現する数理的・確率的なフォーメーション・モデルを構築することで、ロボットにも適応可能な誘導モデルが構築可能となります。また、実フィールドでのモデル検証を行うため、ロボットの周囲にいる子供たちをロバストに認識する技術の構築も進めます。構築した群衆ナビゲーションモデルを、実際のロボットへと実装し、実験を通じてモデルの改良と検証を進めます。最終的には、これらの技術を統合し、子供たちがグループからはぐれてしまう状況を予防しつつ、目的地まで誘導するナビゲーション技術の構築を目指します。

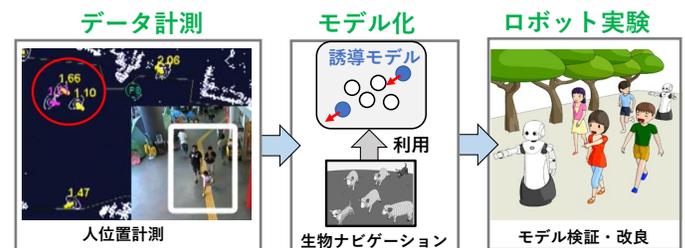


図 1 研究アプローチ:
人グループの動きを再現する誘導モデルを生物ナビゲーションを利用して構築し、実ロボットで検証

研究成果紹介:

渡り鳥(オオミズナギドリ)幼鳥の脳内にある頭方位細胞は北を好む



高橋 晋

同志社大学・大学院脳科学研究科・教授

はじめに

脳内には、頭が特定の方位を向いたときに高頻度に活動する「頭方位細胞」が発見されており、方向感覚を司る細胞と考えられています。この細胞はこれまでに、哺乳類、鳥類、魚類だけでなく昆虫の脳内からも発見されている、ナビゲーションに深く関与する細胞です。そして、脳内コンパスと考えられてきましたが、特定の方位（例えば北など）に反応しないので、地磁気とは無関係と考えられてきました。ですが、これまでに頭方位細胞が発見されてきた動物種は、磁気感知能力を持たない、もしくは能力があっても磁気に頼らないだけなのかもしれません。

野生動物の海鳥、ハト、サケ、ウミガメなどのように、渡りや回遊と呼ばれる長距離移動を行うものは、地磁気を頼りに移動することが知られています。その中でも、繁殖地と越冬地の間を数千キロメートルも行き来する海鳥類は、目印のない海上を迷うことなく移動します。その際、海鳥類は地磁気などを手がかりとして目的地にたどり着くという説があります。これまでの研究により、鳥類は眼の中に磁気を感じ取る物質

をもっており、地磁気を見ることができるという説があります。また、ハトの脳内にある前庭神経核では、磁気を感じ取る細胞が発見されているため、鳥類の脳内には磁気感覚があるようです。

この前庭神経核は、頭方位細胞の活動に深く関与することが知られており、方向感覚と磁気感覚は、同じ神経核を共有していると考えられます。例えば、磁気感覚により目的地への方位である南がわかったとすると、その目的地へ向かうためには、頭の方角を南へ向けるという方向感覚との協調が必要になります。ところが、脳がそれら磁気感覚や方向感覚をどのように組み合わせるのか、その実体は未解明でした。

この課題を解決するには、研究分野を跨ぐ学際的な共同研究が必要です。しかし、これまで、ネズミ（ラット、マウス）などの実験動物を対象として神経活動を計測する神経科学者と、野生動物を対象として行動や生態を研究する生態学者の間には、ほとんど交流がありませんでした。そこで本研究では、本領域からのサポートを受け、従来の学術領域を越えて共同することで研究に取り組みました。

本研究では、巣立ち直前のオオミズナギドリの子を研究対象としました。オオミズナギドリは、日本や韓国、中国の島で繁殖する海鳥で、親鳥は子育てが終了するとフィリピンやインドネシア、オーストラリア北部へ渡ります。また、雛も巣立ち後、親とは別行動をとって同地域へ向かいますが、巣立ち後一ヶ月の間に半分以上の個体が死亡することがわかっています。オオミズナギドリは海面を薙ぐ（切る）ように水面すれすれを飛ぶことにより、頻繁に羽ばたかずに滑空移動することができます。そのため、基本的に陸上を飛ぶことはありません。これらの知見は、動物に超小型の機器を装着するバイオロギング研究によって得られました。

研究の背景

ところが2017年に新潟県の粟島の巣立ち幼鳥について、驚きの生態が依田班のバイオロギング研究から発表されました。成鳥は本州を迂回して海上を移動していたのですが、巣立ちした幼鳥は本州上の険しい山を越えて太平洋に到達していたのです（図1）。海上

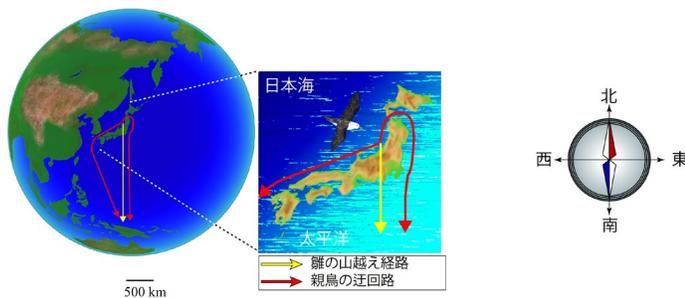


図1：オオミズナギドリの幼鳥と親鳥の渡り経路
Takahashi et al., Science Advances, 2022 より抜粋

飛翔に適応した形態や行動を備えているオオミズナギドリにとって、山越えを含む陸上飛翔は命を危険に晒す多大なリスクを伴います。実際、山越えの途中で落下して死亡してしまう幼鳥も多くいました。このことから、オオミズナギドリの幼鳥は、日本列島の地形についての知識がなく、成鳥のように陸地を迂回することができないこと、それにも関わらず南へ向かって真っ直ぐに渡ることが示唆されました。いったいオオミズナギドリは、何を見て、あるいは感じて、渡るべき方角へ飛翔するのでしょうか。

研究手法と成果

この結果を踏まえ、高橋班は、依田班と共同し、オオミズナギドリの子を対象とした研究を開始しました。そして、空間や方位認知と関係が深いと考えられている内側外套と呼ばれる脳部位に着目し、そこでの神経細胞活動と頭が向いている方位との関連性を調べることにしました。

まず、小型軽量かつ無線で脳活動を計測可能なニューロ・ロガーと呼ばれる計測装置を活用し、ネズミを対象として培ってきた電気生理学技術を組み合わせ、

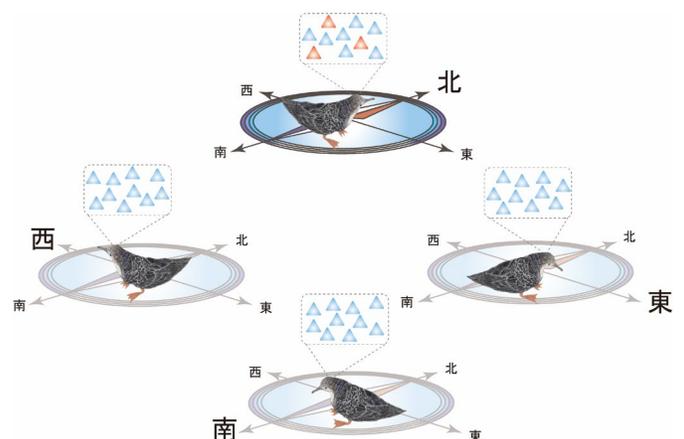


図2：北を好むオオミズナギドリ雛の頭方位細胞を示す模式図

自由に歩行するオオミズナギドリの雛の脳活動を記録する手法を確立しました。

実験空間内を自由に歩行しているオオミズナギドリの雛の内側外套にある神経細胞から発せられる電気的な活動を記録し、その頻度と雛の頭部が向いている方位との関係性を調べた結果、頭部がある一定の方位を向いているときに高頻度に活動する「頭方位細胞」を発見しました。

哺乳類、鳥類、魚類などを含む従来研究は、それぞれの頭方位細胞は、動物の頭部が特定の方位を向くと活動頻度を上昇させることを明らかにしています。例えば、複数の頭方位細胞を集めると、全方位を余すところ無く一様に分布することが知られています。ところが、本研究において発見したオオミズナギドリ雛の脳内にある頭方位細胞は、あたかもコンパス（方位磁針）のように北方位に偏って分布することが示唆されました（図2）。また、この北を好む傾向は、実験場を数キロメートル以上移動させても同様に見られましたので、方位を知る手がかりとして、位置に依存しない地磁気などを活用していると推測されます。

このように、多動物種に跨り存在する頭方位細胞が、渡り鳥においても発見されましたが他動物種との違いもあったため、頭方位細胞が種を越えて保存されてきた可能性だけでなく、それぞれの動物種が環境変化に適応して進化させた結果（収斂進化）であるとも考えられました。

我々は、本発見を踏まえ、雛の脳内にある頭方位細胞がコンパスのように方位を知らせ、移動経路を誘導しているという仮説を提唱しています。本研究の発見とは逆に、頭方位細胞が南を好んでいたとすると、南に向かう数千キロメートルの渡りの最中に頭方位細胞は継続的に活動し続けなければならず、エネルギー効

率が悪いと考えられます。そのため、オオミズナギドリ雛の頭方位細胞が北を好む理由は、それが「誤報」となり、頭方位細胞が活動していれば間違った方向へ飛んでおり、活動しなければ目的地がある南方へ正しく向かっていることを知らせるためかもしれません。

成果の意義

多動物種に跨り存在する頭方位細胞は、方向感覚を司りますが、オオミズナギドリ雛の場合は磁気感覚も司っているようです。そのため今回の研究成果は、オオミズナギドリの雛では、方向感覚と磁気感覚が脳内で統合されていることを示唆しています。将来的には、磁気感覚と脳活動の関連性などを通じて渡りを理解する新しい研究展開が生まれることが期待されます。また、渡り鳥のナビゲーションの仕組みを理解することにより、保全に関する新たな知見に繋がること期待されます。オオミズナギドリの雛は、移動する際に多くの危険に直面します。例えば、巣立ち直後は街灯に引き寄せられて落下したり、とりわけ険しい山越えルートを選んでしまったりして、巣立ち後一ヶ月の間に何と7割ほどが死亡してしまうこともあります。移動生態やメカニズムを正しく理解することによって、生態保全や保護に繋がるよう研究を行っていく必要があります。

渡りは、あたかもコンパスや地図を持っているかのように、数千キロメートルを正確に移動する動物が持つ驚異的なナビゲーション能力です。地磁気や匂いに基づいて理解されてきた渡りが、今回の研究により脳内からも理解できることで、海を越え北半球から南半球まで旅する渡りのメカニズム理解がより一層進展するだけでなく、渡り鳥の生態理解から、その保全に関する新たな知見に繋がること期待されます。ま

た、学際的な研究によって、新しい研究領域を切り開くことができることを示しました。

論文情報

Takahashi, S. Hombe, T., Matsumoto, S., Ide, K., Yoda, K.,
“Head direction cells in a migratory bird prefer north”,
Science Advances **8**, eabl6848 (2022).

研究成果紹介:

巨大翼竜は飛ぶのが苦手: 航空力学を用いて絶滅巨大鳥類と翼竜のソーリング性能を現生種と比較

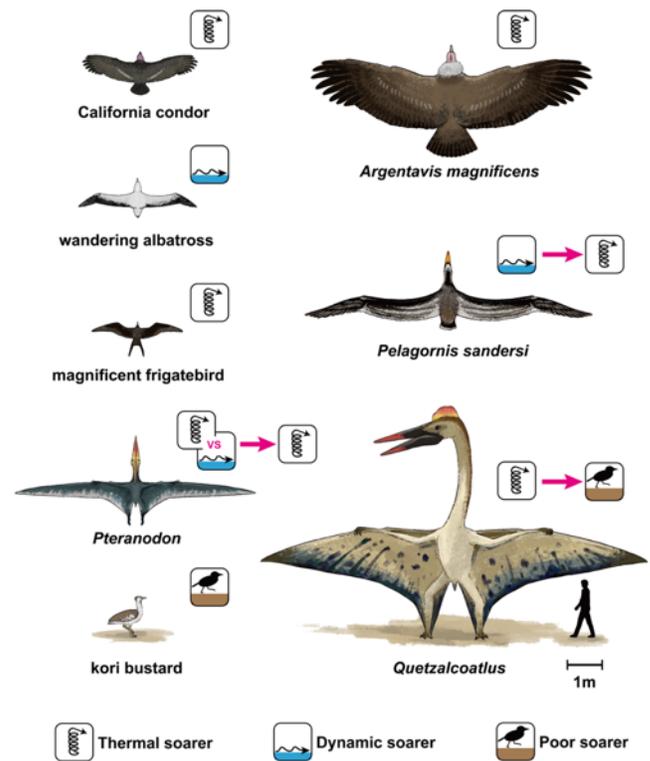


後藤 佑介

名古屋大学・大学院環境学研究所・特任助教

現生の大型鳥類の多くは、風を使った滑空飛行（ソーリング）を行います。現生種のソーリング飛行は大きく分けて2種類あり、トビやコンドル、グンカンドリのように上昇気流を使って上昇滑空を繰り返すサーマルソーリングと、アホウドリやミズナギドリのように海上の風速勾配を使ったダイナミックソーリングがあります。絶滅した鳥類や翼竜の中には広げた翼の長さが7~10m近くに達するものが報告されており、これらの種もソーリング飛行を採用していたと考えられています。しかし、絶滅した巨大鳥類や翼竜がどちらのソーリング飛行を採用していたかは、定量的な評価がされてきませんでした。

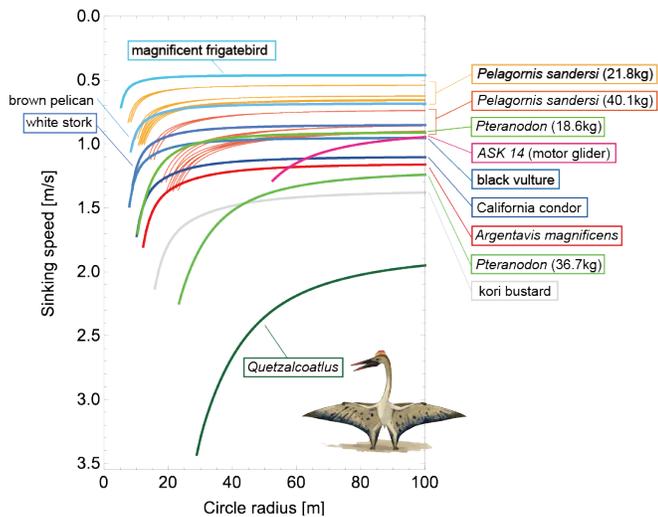
滑空する鳥の飛行はグライダーの運動方程式でよく記述できることが知られています。そこで力学モデルを使って、2種の絶滅巨大鳥類(アルゲンタビス、ペラゴルニス・サンデルシ[翼開長6~7m])と2種の翼竜(プテラノドン[翼開長5~6m]、ケツアルコアトルス[翼開長10m])、そしてソーリングをする現生種について、そのダイナミックソーリングとサーマルソーリングの能力と持続的なソーリングに必要な風速を計算、比較しました。その結果、アルゲンタビスは従来の説通りサーマル



今回の結果から推定された絶滅種のソーリング方法 (イラスト:きのしたちひろ)

ソーリングに適していたこと、ペラゴルニスはこれまでダイナミックソーリングをしていたとされてきましたがサーマルソーリングに向いていたことがわかりました。また、プテラノドンはダイナミックソーリングに適して

いたとする研究(Witton & Habib 2010)とサーマルソアリングに適していたとする研究(Palmer 2011)がありましたが、我々の結果は後者を支持しました。最後に、ケツアルコアトルスは、ダイナミックソアリングとサーマルソアリングいずれの能力も現生種に比べて低く、ソアリング飛行に不向きであることがわかりました。



サーマルソアリング性能の種間比較. 円軌道を滑空する際の、旋回半径(横軸)に対する降下速度(縦軸)を、現生種6種と絶滅種4種について力学モデルから計算した。線が左上にあるほどサーマルソアリングの性能が高いことを意味する。ケツアルコアトルスだけ極端にサーマルソアリングの性能が低いことが見てとれる。

巨大翼竜は飛べたのか？

ケツアルコアトルスをはじめとするアズダルコ科の超大型翼竜は、彼らの骨格や足跡の化石を調べた研究から、陸上生活に適しており屍肉を漁る生活をしたと考えられてきました。一方で、一度飛び立つと着陸せずに大陸を横断できるほどの非常に高いソアリング能力も持つと推測する研究者もいます。つまり、ケツアルコアトルスは陸と空、どちらの移動にも優れた“スーパー翼竜”と考えられてきたのです。しかし実際には、ケツアルコアトルスが持続的にソアリング飛行をするのに必要な風条件を力学に基づいて定量化した研究はなく、今回の研究が



飛ぶ生き物と飛びたい(?)生き物の今昔
(イラスト:きのしたちひろ)

ら、ケツアルコアトルスは現生鳥類と比べるとソアリング飛行に強い上昇気流を必要とすることがわかりました。今回の結果と、先行研究で示されているように本種が短い羽ばたき飛行しかできなかったこと、陸上生活に適した形態をしていたことを合わせると、本種並びに同サイズの大型翼竜は、現代のアフリカオオノガンやジサイチョウのように、翼を持ちながらまれに短距離を飛ぶだけで陸上を主な生活の場としていた可能性が高いと考えられます。ケツアルコアトルスの生息地に強い上昇気流が吹いていた可能性も考えられますが、その検証には分野を跨いだ更なる研究が必要でしょう。

成果の意義

これまで翼竜のソアリング性能は多くの研究で言及されてきたにも関わらず、その定量的な評価を行った研究は

ほとんどありませんでした。今回の研究では、力学モデルを使ってソアリング性能を定量化する枠組みを具体的に提示しました。これによって、客観的に絶滅生物のソアリング能力の検証が可能になりました。またその評価に必要な仮定を詳述しており、今後、古生物学、工学、動物行動学、古気候学などさまざまな分野の研究者が、各分野の知識を持ち寄り、協力しながら、絶滅飛翔生物の飛行性能をさらに正確に解き明かしていくための助けになると期待されます。例えば、この論文の発表から間もなく、翼開長が9mに達したとされる新種の超大型翼竜が報告されました。このような新種が発見された

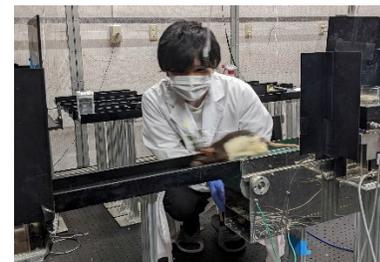
際も、体重、翼面積、翼長の推定値が得られれば、本研究の手法を利用してそのソアリング性能を定量化することができます。

論文情報

Yusuke Goto, Ken Yoda, Henri Weimerskirch, Katsufumi Sato, How did extinct giant birds and pterosaurs fly? A comprehensive modeling approach to evaluate soaring performance, *PNAS Nexus*, 2022;, pgac023, <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac023>

若手向け企画報告:

勉強会(1/28)に参加しました



澤谷 郁哉

同志社大学・心理学部・3 回生

2022年1月28日、第2回勉強会が開催されました。この勉強会では、東北大学 D2・産総研の西田遼さんと、明治大学の白石允梓先生に、それぞれのご研究についてご紹介いただきました。

西田さんは、「デジタル空間でのモビリティプログラミング」と題して、計測したヒトの経路選択行動のモデリング、シミュレーションによって、サービス設計につながる最適な介入方策をデジタル空間で検討するご研究についてお話いただきました。

ヒトの意思決定は、周辺他者や外的な刺激、認知状態に影響される不安定なものですが、避難訓練やイベント終了後の駅までの大規模なヒトの移動を計測・モデル化し、選択経路の誤りや指示に従わない移動をも再現可能なことをご説明いただき、人間らしい現実的な移動をデジタル空間で表現できることに驚きました。さらに、建物からの避難など効率的な移動が求められる状況においてどのような誘導が効果的か、シミュレーションや因果推論、強化学習を用いた介入の効果推定、誘導戦略の最適化によって検証する方法を紹介いただきました。

自然の動物の大規模な集団行動に対する介入方法をサイバー空間で模索し、フィジカル空間で実践できれば、効果が高く実験者にも動物にも負担の少ない理想的な介入実験が可能になると感じました。また、移動の目的の違いや内的要因（焦り、恐怖など）が影響する状況では最適な介入方法が変わってくるのではないかと気になり、災害など差し迫った状況における移動のシミュレーションについても興味を持ちました。

白石先生は、「アリの行動観測と数理モデル」と題し、あたかも1個体の動物であるかのように組織的に振る舞うアリの集団行動のご研究について紹介いただきました。

アリコロニー全体に共有されるストレスと、それに対する個体ごとの反応により労働量の分配を説明する反応閾値モデルをご解説いただいた上で、数理モデルでは説明できない活動量のダイナミックに変化する性質を実際に観測することで検証されていました。各個体にICチップを装着し、餌場と巣の間のセンサーの通過を記録することでクロオオアリの集団における役割の変化や労働量の偏りを分析されており、数ヶ月ス

ケールで観測することで見えてくる集団の経時的な変化について、より大きな動物ではどのような方法で観測可能だろうかと考えながらお話を聞いていました。

白石先生は、労働メンバーを構成するグループが一定期間で入れ替わることから、個体間の何らかの相互作用による役割分担メカニズムが存在する可能性について言及されており、社会的動物の秩序だった集団行動を可能にするコミュニケーション方法に強く興味を持ちました。また、観測・解析にあたっての問題点や試行錯誤されていることなどについて詳しくご説明していただき、動物を用いて実験する身としては、実験系の工夫や得られたデータの解釈について考え直すことのできる貴重なお話でした。

ヒトからアリまで、集団で行動する生物の階層的なナビゲーション研究についてお話いただき、対象とする動物の性質や集団の規模により様々な研究方法があることを学ぶと同時に、そのような行動を可能にする神経基盤を探る自分の研究に対して、より一層意欲が高まりました。

若手向け企画報告:

勉強会(2/18)に参加しました



吉野 寿紀

同志社大学・生命医科学研究科・D1

2022年2月18日に開催された学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」、第3回領域勉強会に参加しました。ここではこの勉強会の内容や参加して感じたことなどについて報告をします。今回の勉強会では「ニーズとシーズのマッチング」というテーマでフィジカル班の依田先生(名古屋大学)、白石先生・西森先生(明治大学)がそれぞれニーズに関する情報を、サイバー班の野田先生(南山大学)がシーズに関する情報を共有されました。参加者は各班の代表の先生方から学生まで幅広くおり、あわせて約30名がオンライン(Zoom)で集いました。

まず、依田先生が共有されたニーズでは、前回までの勉強会でも共有されたオオミズナギドリについて、巣穴における計測のハイテク化に関するニーズについて共有されました。野生下のオオミズナギドリを対象とした実験の場合、巣穴における出入りの記録や中の音声計測・体重といった計測結果も重要なデータとなります。しかしながら、こういった野生動物の計測環境は原始的な部分が多く、様々な問題点が挙げられています。従来の磁気を使ったホールセンサでは巣穴入口付近に装置を埋める工事が必要であり、観測対

象である百匹以上の巣穴に配置することは困難です。そこで、このような問題を解決できるアイデアはないかと他の参加者と議論をしていました。結局のところ有効なアイデアはすぐに発見できませんでしたが、今後も引き続き検討が必要だと感じました。

次に白石先生・西森先生からはアリのトラッキングに関するニーズの共有がありました。こちらもフィジカル班による発表で、RFIDという個体識別タグを用いたナビゲーション研究における現状の課題について動画資料などを共有いただきました。アリはミリメートルオーダーのサイズ感にもかかわらず、RFIDを装着した実験を可能にしている点でとても興味深い研究なのですが、今回共有されたニーズ点は装着側ではなく、読み取り側のシステムについてでした。白石先生らの研究グループでは透明な管の中をアリが通っていくような実験システムとなっており、その通過情報をRFIDの読み取りによっておこなうというものでした。しかしながら、このRFIDの読み取りでは、通過した時刻情報のみが記録され、管のどちらからきたか判別することができない、というものでした。これに対して私は、複数個のセンサを配置してその時間差を

とればよいのでは？と安直に考えたのですが、やはり生物相手の研究ではそううまく行かず、読み取り機の下でアリが行ったり来たりを繰り返してしまうと、多量のログがたまってしまうということでした。ここまで複雑になると、システムとしても対応が難しくなりそうなことは容易に想像できました。なにかスマートな解決策はないかと私も思案してみましたが、なかなか思いつきませんでした。一方で、他の参加者からは反射板のような構造があればうまく読み取れるのではないかというアイデアが生まれ、「それはアリ」、と冗談を交えながらも少し前進したような雰囲気でした。また、この後に西森先生から共有されたアリの群行動のトラッキングに関してはかなり具体的に議論が発展していました。西森先生のグループの最新の研究結果によると、アリは地震などの緊急時にフェロモンによるナビゲーションだけでなく、視覚も使っているのではないかと考えられているようです。実際に動画を見てみると、普段とは異なる行動をしているとはっきりわかりました。この映像をトラッキングする際は先ほどのRFIDによる個体識別までは不要とのことで、サッカーのトラッキングシステムが応用できるの

ではないかという話が出ました。他にも具体的なアイデアが募り、活発な議論が展開されました。

このように、フィジカル班が直面している計測手法の地道さは私もよく共感する内容であり、サイバー班を含めた多くの皆さんとアイデアを出し合って解決できることを期待しています。

最後はサイバー班の野田先生から二次元平面上での通信技術について、平面上で突然動き出す装置やカラフルに光る興味深い映像を使ってシーズを共有されました（野田先生の背景に写っていた光る服も印象的でした）。これは平行平板からの電磁波の漏れを使った装置のようで、布や服といった装着型のデバイスにすることも可能ということで非常に興味深くお話を聞きました。これをうまく活用できれば画期的な実験系になるということで、同志社大学の高橋先生のグループが詳細に議論をしていました。また、開発中のNFC通信モジュールは伸縮につよく、皮膚に貼り付け可能とのことで、フィジカル班はどのグループも自分の研究対象に装着することをイメージしたと思います。このような形で、フィジカル班の課題を解決する技術と出会うことを今後も楽しみにしています。



最後に参加者の集合写真を撮りました。（吉野はカメラが間に合わず。。）

若手向け企画報告:

勉強会(3/18)に参加しました



増田 祐一

東京大学・新領域創成科学研究科・特任研究員

2022年3月18日に開催された学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」, 第4回領域勉強会の報告します。この勉強会では、まず藤岡先生(大阪大学)より「コウモリの行動生態から学ぶ超音波ナビゲーション」と題し、個体レベルから集団レベルにおけるコウモリの行動計測や、個体群として協調する超音波ナビゲーションアルゴリズムに関して紹介がありました。

コウモリの行動生態において最適パッチ利用(協調的採餌戦略)についてのお話では、各コウモリの餌場での滞在時間と捕食数を見ると、別のコウモリの出現直後に餌場を去るコウモリが顕著に多く、複数個体間で相互に譲り合うことで効率よく採餌を行う互恵的利他行動をしている可能性が示されました。群行動については、コウモリの軌跡・エコーロケーション計測方法や、近接するコウモリとの位置関係に偏りが見られたお話を聞きました。ログボットの様な装着型の計測システムが実装される事により、群行動に対する新たな知見が得られるかもしれないといったお話は大変興味深かったです。

次に筒井先生(名古屋大学)より「ヒトおよびエージェントの追跡-逃避行動」と題し、追跡者と逃避者が相互作用する複雑な現象に関して紹介がありました。

まずヒトの1対1の追跡-逃避課題では、多様な行動の選択肢があるように見えて、実は2者の行動には強い規則性があることがニューラルネットワークによる学習モデルにより示されました。

これを集団追跡行動に発展させた課題では、捕食者側が獲物を共有するかどうかの条件を変えることで、追跡方法が大きく変化するというとても興味深い学習結果が示されました。この集団捕食に関しては質疑応答も活発に行われ、〇〇の条件ではどういった結果になるかなどの質問が様々な生物分野の研究者の方たちから寄せられていました。異なる研究領域の研究者が活発に意見を出し合うことで新たな知見や研究が生まれる予感を感じさせる本勉強会はとてもワクワクする刺激的なものでした。今後も積極的に勉強会に参加し、自分も積極的に意見交換することで、新しいアイデアやテーマが生まれる一助になればと思います。

若手向け企画報告:

勉強会(5/27)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

2022年5月27日、第6回勉強会が開催されました。この勉強会では、京都大学の竹内考先生と、名古屋大学の後藤佑介さんをご発表されました。

1人目の発表者の竹内先生には、「機械学習の概説から最新技術まで」と題して、機械学習の概説と、生態学にも応用できるかもしれない先進的な内容（バイアス除去型予測モデリングやAIの説明可能性）についてお話いただきました。

機械学習の概説として、予測型の機械学習（特に離散値の予測を行う教師あり学習である）に焦点を当て、ロジスティック回帰モデルから深層学習モデルにわたるまで幅広くご紹介いただきました。簡潔でありながらも、本質を捉えたご説明により、機械学習の初学者である私の理解は深まりました。

発展的な話題のひとつ目として、バイアス除去型予測モデリングについてご説明いただきました。バイアスをできるだけ排除して、介入効果を推定する手法（e.g., 逆確率重み付け）は、今後生態学とその周辺領域において強力なツールとなると感じました。対象に音を聴かせるプレイバック実験などでは、ある程度

条件を統制できるかもしれませんが、多くの野外研究では様々な制約によってバイアスが生じてしまいます。ましてや、RTC（ランダム化比較試験）を行うことができるケースは少ないでしょう。また、生態学に留まらず、保全科学や動物福祉など様々な分野への応用も興味深いと考えながらお話を伺っておりました。

次に、説明可能AI（eXplainable AI）に関する最新の研究をご紹介いただきました。画像の認識や解釈の問題を例に、感度法（データの一部を改変し判断結果を変化させる部分を探し出す方法）や、勾配法（ある特徴を微妙に変化させることによって出力がどれだけ変化するかを調べる方法）、GradGANなどの最新手法について、それぞれの長所と短所をご解説いただきました。これらの最新の研究成果を、時系列センサーデータに応用することも期待できるとのことで、私自身の今後の研究にも、ぜひ使ってみたいと考えています。

質疑応答では、ご紹介いただいた技術の応用に関する話題や、機械学習の原理をどこまで理解して使うべ

きなのか、といった実用上の問題についての興味深い議論が盛り上がりました。

生態学分野では、統計モデリングの分析手法（一般化線形混合モデルなど）が広く用いられてきました。これらは、予測よりも、観測された現象を説明するためのツールとして使われてきた傾向が強いのと思います。しかし最近になって、モデルの予測性能を評価するための指標（AIC や WAIC など）を用いるいっぽうで、結果の解釈や議論においては現象の説明に焦点を充てるというあり方が、問題視され始めていると思います。予測型と説明型の違いは、わかった気になっても、ストーンと落ちていない感じもあり、予測型と説明型の機械学習の本質的な違いはいったい何なのか、という点についても改めて興味を持ちました。

2人目の発表者の後藤さんには、「ソアリング飛行の理論とバイオロギングデータから探る新しい視点」と題して、ソアリング飛行の力学と、その理論を用いて絶滅した超大型鳥類と翼竜のダイナミックソアリングやサーマルソアリングの性能を現生種と比較したご研究について説明していただきました。

発表の前半では、1)羽ばたき飛行とソアリング飛行の違い、2)ダイナミックソアリングとサーマルソアリングの違い、3)ソアリングは、翼を動かさず、気流や風を使う飛行方式であるため、航空力学の知識を応用することができること、そして、4)絶滅した超大型鳥類と翼竜のについても、古生物学者が蓄積してきた形態推定値のパラメータを使って、それらのソアリング性能を評価することができること、をご説明いただきました。そのうえで、現生種とのソアリング性能の比較研究についてご紹介いただきました。

今回の発表では、サーマルソアリングにおける上昇性能に焦点を絞り、降下速度と旋回半径の比較から、

アメリカグンカンドリなどの現生鳥類と比べて、ケツアルコアトルスやプテラノドンなどの翼竜のサーマルソアリング性能は低かったらうという解釈をされていました。これは、「ケツアルコアトルスは長時間のサーマルソアリングができた」という従来の通説に反する、とても興味深いものでした。

最後に、サーマルソアリングを行うグンカンドリを対象に、エウロパ島で行ったバイオロギング調査の結果もご紹介いただきました。ロガーで収集した3次元の軌跡データとバンク角のデータから、実際の軌跡データがきれいな円経路を描かない場合があることと、高度に応じてバンク角がダイナミックに変化することをご説明いただきました。これらは、従来の力学モデルの「バンク角は一定である」という仮定に疑問を投げかけるとともに、最新の理論研究を裏付け、実際の上昇気流の乱流という性質を考慮する必要性を示唆する大変貴重な実証データになるとのことでした。

質疑応答では、「古生物学者による形態の推定値はどの程度信頼できるのか」、「サーマルソアリングをする鳥はどうやって上昇気流を見つけているのか」、「滑空比はどのようになっているのか」などの興味深い話題について議論が盛り上がりました。

後藤さんのご発表を伺うことで、鳥類の飛行に関する最先端の研究内容の一端を垣間見ることができ、大変勉強になりました。私は、バイオロガーが介入するタイミングを自律的に判断するための、機械学習モデルの開発に携わっています。主にウミネコの飛行行動をリアルタイムで認識して、条件を満たした時にだけ介入を行う仕組みを作っていますが、ひとくちに飛行中と言っても、羽ばたき飛行中とソアリング飛行中とは介入効果が異なるかもしれず、両者を区別できるようなモデルの必要性に気付くことができました。

若手向け企画報告:

勉強会(6/24)に参加しました



伊藤 真

名古屋大学大学院・情報学研究科・研究員

2022年6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7回領域勉強会について報告します。この勉強会では、まず山中先生(明治大学)より「動物の行動測定のためのソフトウェア開発」と題して、生態学者向けに開発された動物追跡ソフトウェアUMTrackerの仕組みやメリット・デメリット、そして現在改善中の新たな機能などについて、分かりやすくご説明いただきました。UIに工夫したというご発表の通り、プログラミングをあまり知らない生態学者でも使いやすいソフトウェアであると感じました。また、特定の種に限定することなく幅広い種や状況に調整次第で対応できるのは非常に良いところだなと思います。現在取り組んでおられるノイズの効率的な除去手法についても、特に野外など発展的な観察ではかなり有用だなと感じました。幅広い分野の研究者が気軽に動物追跡を取り入れることが可能になるのもそう遠くないと思います。

次に今後アウトリーチ活動などの側面で協力していただける中島さち子先生に自己紹介を兼ねた共同プロジェクトの展望についてお話しいただきました。

STEAM教育など興味深い様々な活動はとても参考になりました。また、中島先生は大阪万博でのパビリオンを担当されており、そこで階層的生物ナビ学の研究成果をあたらしい形で発表するというコラボレーションの展開は非常に興味深いと感じました。

最後に、飛龍先生(同志社大学)より「コウモリ研究でやりたいあんなこと、こんなこと 計測と分析のニーズ相談」と題して膨大な数の研究アイデアについてお話しいただきました。コウモリのトラッキングやバイオリギングを行う上で現在直面しているポイントのお話や、コウモリの認知や社会行動に関する新しい研究アイデアについて9つほどご紹介いただきました。新しい研究ネタの可能性について考えるととてもよい時間になり、今後階層的生物ナビ学で様々なコラボレーションが起こる起爆剤になるように思いました。個人的にはどんどんアイデアを生み出すバイタリティや共同研究を進めるエネルギーなど本当に参考になるなあって思って聞かせていただきました。自分自身も抱えているちょっとしたアイデアをもっと外に出してどんどん研究を広げていきたいなと改めて思いました。

領域イベント報告:

フィジカルイベント(7/5)参加報告



M1 米川 泰斗

筑波大学大学院理工情報生命学術院 システム情報工学研究群

2022年7月5日に開催された第一階層ナビフィジカルイベントに参加させていただきました。私は研究者グループで行われるイベントに参加するのは初めてでしたので、非常に緊張していましたが、終わってみると興味惹かれる、面白い研究内容を聴くことができ、学び多く、楽しい時間でした。具体的には、大きく2つの良い経験をさせていただけたと思います。

1つ目は、日本で行われている動物行動の研究を広く知ることができたことです。研究紹介していただいた内容は、バイオリガーを用いたフィールドワークから、研究室での実験・観測、計測のための機械学習処理まで様々で、私が思っていた動物行動学という学問の範囲を大きく広げられました。今回のイベントで興味を持った研究内容について、所属している研究室のゼミで紹介させていただき、理解を深めることにもつながりました。

2つ目は、研究者の方々と交流する機会を得られたことです。私は学外の研究者の方と交流を持ったことがなかったので、オンサイトのイベントでその機会をいただけたことは貴重でした。明治大学の山中さんに

はUMATrackerの内部処理についてお話を伺い、現在私が用いているトラッキングソフトウェアの利点・弱点を再確認できました。兵庫県立大学の川嶋先生には、そのトラッキングソフトウェアを用いる上での疑問点や、アドバイス等いただきました。また、会場で展示されていた、空中超音波触覚を用いてアリのドラッグを行う機器を実際に触り、動作原理を肌で感じることができました。研究者の皆さんが顔見知りの方や共同研究者の方と研究に関する会話をされているのを見てみると、情報交換が盛んにおこなわれており、研究者同士が交流する場として、オンサイトイベントには意義があると感じました。

今回のフィジカルイベントでは、ミクロからマクロまで、集団で行動する生物の階層的なナビゲーション研究についてお話いただき、対象とする動物の性質・集団規模により研究方法は様々であることを知ることができました。同時にそのような行動の分析を可能にするトラッキングについての自分の研究に対し、必要性を再確認し、一層意欲が深まりました。

国際研究活動報告:

ハヤブサの追跡戦術解明にむけた 野外実験手法の開発



西海 望

基礎生物学研究所

私は2022年2、3月に米国ジョージア州にある University of Georgia に三週間滞在し、鳥の餌追跡と脅威回避における戦術を探るための予備的な実験を実施してきました。

私は現在、様々な動物を対象に、追跡-逃避の関係にある動物二体の片方を映像やロボットなどで構成された「制御可能な仮想の動物」に置き換え、もう一方の「実際の動物」との追いかっこを成り立たせようとしています。これによって、動物の様々な移動パターンを仮想動物に再現させ、相手動物に対する立ち回りの良し悪しを検証することが可能になります。また、対象動物の生活に仮想動物を介入させることで、例えば危険にさらされた時の対象動物の意思決定、運動能力などを詳細に調べることが可能になります。これらのことから、本構想は追跡-逃避という多くの動物に共通して見られる行動を深く探究できる強力な手法として期待されています。

この構想をハヤブサ（追う側）と伝書バト（逃げる側）の関係に適用して、ハヤブサを無人航空機で代替

して伝書バトとの追いかっこを成り立たせようという取り組みが令和三年度から始まりました。鳥という行動範囲の広い動物を対象とするため、遠距離ではリアルタイムGPS、近距離では低遅延の機体搭載カメラと、距離に応じてセンサーを使い分けて無人航空機を制御するものであり、バイオロギング、画像処理、無線通信、リアルタイム情報処理といった技術を結集して臨む野心的な試みです。ハヤブサは逃げ回る鳥を巧みに捕らえることができ、その追跡戦術を調べる意義は大きいと考えられます。他方、伝書バトは、実際にハヤブサの獲物となる鳥であり、なおかつGPSやカメラなど各種計測機器を搭載しやすく、ある程度飛行コースを定められ、実験後に確実に個体を回収できるため、実験動物として好適です。

今回の実験では、この取り組みの第一弾として、無人航空機による伝書バトへの追跡を図1のように手動操縦で実施し、自律誘導に要求される技術水準や伝書バトの逃避反応など基礎的な情報を収集してプロジェクトの見通しを得ることを目的としました。この実

験を日本国内で実施することが難しかったため、University of Georgia の伝書バト利用環境ならびに大学近郊の広大な農地（実験場）を使わせていただきました。



図1 実験時の操縦環境
無人航空機搭載カメラの映像と GPS 座標は無線通信によってパソコンに転送され、操縦者はパソコン上の表示を見ながら機体の操縦を行う。パソコンの通信に不具合が生じた場合の対応として、操縦者は FPV ゴーグルを装着し問題発生時に直ちにモニターを切り替えられるようにしている。

滞在期間三週間のうち、はじめの二週間は実験の実施要領の検討に終始しました。検討内容としては、まず伝書バトがとりうる移動経路を把握して、適切な放鳥地点と無人航空機飛来地点の策定を行うことが挙げられます。また、実験中は、無人航空機の操縦、伝書バトのリリース、空域および GPS 座標のモニタリング、といった複数のオペレーションを私と実験補助者との分担で行う必要があったため、それを円滑に進めるための手順や交信規則などを決めました。それから、無人航空機の制御や GPS 座標とカメラ画像の伝送で無線通信を多用し、時折深刻な電波干渉が生じたため、その回避策を決めました。こうして、最後の週によりやく諸々の要領を詰め、安定して実験を行えるようになりました。

実験の結果、各種計測機器が良好な性能を発揮していることが確認できました。まず機体搭載カメラについては、図2 AB のように画像中のハトは背景となる

大地に対して明瞭なコントラストを示しており、機械による自動検出が可能なものでした。したがって、無人航空機のカメラ軸を基準とした相対方位で伝書バトの方向を常に取得できることとなります。この方向情報と、無人航空機のジャイロ計器から得られるカメラの姿勢情報を組み合わせることで、無人航空機とハトの角度関係を慣性系で取得できることとなります。これによって、例えば比例航法など様々な追跡アルゴリズムを無人航空機に適用することが可能になります。

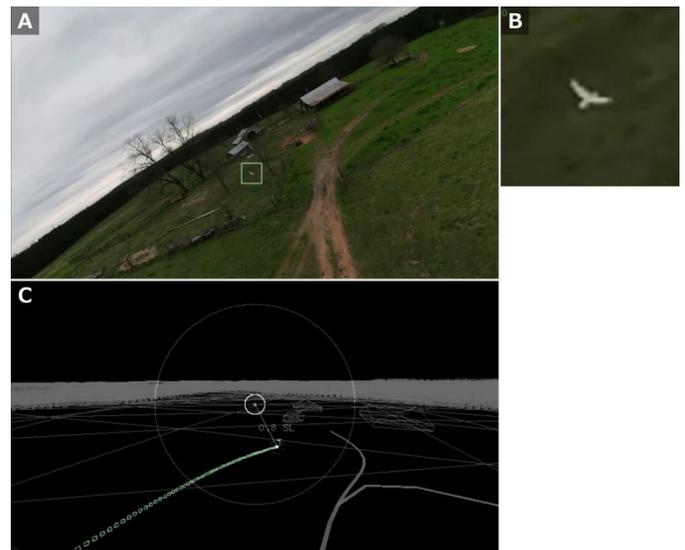


図2 各種センサーの出力状態
(A) 無人航空機搭載カメラからのライブ映像。伝書バトの位置が緑色枠でマークされている。(B) A の緑枠領域の拡大写真。(C) GPS 座標から仮想空間に再構成された無人航空機の主観映像。中央下の小さな白点は伝書バトの位置を示している。白点から左下へ連なる四角い点群は伝書バトの軌跡を示している。

リアルタイム GPS については、得られた GPS 座標情報から無人航空機の主観状況を仮想空間上で再構成したところ、図2 AC のように実際のカメラ映像とかなり似た景色を得られることを確認できました。この結果は GPS の精度の良さを意味するものであり、カメラでハトを検出できないほどの遠距離において GPS だけで十分な誘導を行うことが期待されます。さらに、たとえ近距離でも、多少の遅延を許容すれば

カメラを使わずに GPS だけで誘導を行える見込みであり、カメラで検出しにくい動物であってもおおよその追跡ならば可能であると考えられます。この GPS 機器のおかげで伝書バトの一連の行動記録も収集でき、今後の解析によって、接近してくる無人航空機に対する逃避の意思決定（逃避開始のタイミングや逃避方向）、その際の運動能力などの知見を得られることが期待できます。

以上から、本方式によって無人航空機と伝書バトの追いかっかが技術的に可能であると判断でき、研究プロジェクトを展開する上で有益な情報が得られました。また、伝書バトの行動データも詳細に得られることが確認できました。今後は、今回の実験で確認されたいくつかの課題を解決して、本研究を鋭意進めていきます。また、本方式を活かして、脅威にさらされた伝書バト集団における情報共有や集団としての意思決定を探る研究を University of Georgia のスタッフと共同で進めていく予定です。

今回の実験を実施するにあたって、沢山の方々に支えていただきました。まず、University of Georgia の受入研究者である佐々木崇夫博士には、伝書バトの管理や実験実施のための承認手続き等など多大な準備をしていただきました。加えて、日々の議論の中で様々なご意見をくださり、また同大学での私のプレゼンテーションに対する丁寧な指導をしてくださり、沢山学ばせていただきました。研究以外の日々の生活においても佐々木博士とご家族には大変暖かくもてなしていただきました。今回の渡航では、コロナ禍の影響で当初より滞在期間が短くなり、その中で予定していた実験目標を達成するためにかなり詰めたスケジュールとなっていました。そのため私は毎日気が張っている状態でしたが、佐々木博士のご家族（特に4歳

と6歳の子供達）との関わりのおかげで、とても気持ちが和らぎました。佐々木博士の研究室の学生である Bennett Caughran 氏（図3）は、実験補助者として終始実験にご参加くださり、実験時の分担内容を完璧にこなしてくれました。The Pasture of Rose Creek の Breedlove 夫妻には、実験場となる広大な農地を使わせていただきました（実験期間中にお子さんが生まれるといった感動的な出来事もありました。）。University of Georgia の技術スタッフである Michael Lucas 氏には渡航前から米国での無人航空機運用に関してご助言をいただき、また現地でもバックアップ要員としてご協力いただきました。国内での事前準備と米国での実験の全般を通して、基礎生物学研究所技術支援員渡部美穂子氏に多大な支援をいただきました。国内での飛行試験では、岡崎市スポーツ協会、国土交通省 中部地方整備局豊橋河川事務所 岡崎出張所、岡崎警察署にご協力いただきました。本実験は、科研費 JP16K21735 をはじめ、21K15169, 19H04940, 18K14772 の支援を受けて実施されました。紙面の関係で全員を書ききれませんでした。本実験を支えてくださった全ての方々に謹んでお礼申し上げます。



図3 実験後に、無人航空機を使って記念写真を撮りました。右：Bennett Caughran 氏、左：著者

国際活動報告:

ザンビアにおけるコウモリの生態調査



梶原 将大

北海道大学・人獣共通感染症国際共同研究所・助教

ザンビアはアフリカ南部に位置する内陸国です。首都ルサカの近郊には数万頭のコウモリが生息する洞窟があるのですが、近年、この洞窟に生息するエジプシャンフルーツバットがマールブルグウイルス（エボラウイルスと近縁）や新種の回帰熱ボレリアを保有することを突き止めました。これらの微生物はいずれもヒトに対して非常に重篤な感染症を引き起します。

ザンビアのコウモリから発見したこれらの病原体ですが、同じコロニー内に常に存在するのか？どこからきて、どこへ行くのか？どれ位の地理範囲に分布するのか？感染リスクが高い季節はあるか？等々、その生態に関する疑問はつきません。一般的に微生物の生態は宿主動物の生態に大きく依存しますが、アフリカのコウモリの生態についてはあまり情報がないのが現状です。つまり、宿主であるコウモリの移動を理解することが、病原体の移動を理解すること、ひいては感染症のコントロールに繋がります。

ザンビアの洞窟に生息するエジプシャンフルーツバットの移動や生態に関する情報を得るべく、同じくフィジカル班-飛龍班の藤岡先生と共に、2022年4月、

ザンビア共和国に行ってきました。今回の活動で計20頭のコウモリを以下の3グループに分けて異なるロガーを装着し、データ取得を試みました。

1) 短期追跡グループ:

9頭の個体に PinPoint VHF (Lotek 社) を装着。日没から夜明けの間、5分間隔で GPS データを取得。6日間に渡り夜間の移動を詳細に記録。



図1 ロガーを装着したコウモリ。思っていたよりおとなしかった。

2) 長期追跡グループ:

8頭の個体に PinPoint Argos (Lotek 社) を装着。1日あるいは2日に1度、GPS データを取得。3-6ヶ月間の行動を追跡して長距離移動を観察。

3) ログロボットグループ：

3頭の個体に赤外線カメラを搭載したログロボットを装着。一定時間、移動がなかった場合に撮影を開始するように設定。採餌や寝ぐらでの映像撮影を試みた。



図2 ログロボットを背負い飛び立つコウモリ

ウイルス学一本でやってきた私にとって、今回のバイオロギング調査は全く新しい経験でした。こんな高額デバイスを野に放って、全くデータが取れなかったらどうしようと心中穏やかではありませんでしたが、短期グループでは9頭中9頭の個体からデータを回収することができました。また、長期グループでも今のところ全ての個体からデータが得られており、今も情報が送られてきています。ログロボットグループは、装着後コウモリが無事に飛び立つ様子は確認できましたが、今のところ再回収は叶っていません。現地カウンターパートに搜索を継続してもらっています。

さらに洞窟内に生息するコウモリの個体数を把握することを目的に、赤外線カメラを用いてコウモリが洞窟を飛び立つ様子を撮影しました。初めてのロケーションで困難はありましたが、貴重な映像データを取得することができました。

得られたデータについては、今のところ位置情報を地図上にプロットした段階ですが、すでに色々なことがわかってきました。一晩で100 km以上移動する個



図3 洞窟の前で赤外線カメラ撮影の設定をする藤岡先生。初めての試みに現地カウンターパートも興味津々。

体もいること、国境を超えた活動範囲を持つこと、複数のねぐらを飛び回りながら活用していること、目的地をあらかじめイメージして飛んでいそうなこと、などなど。ウイルス学では解き明かせない発見が続々出てくることに、本アプローチから得られる情報が量・質ともいかに豊かであるか改めて思い知りました。

今年10月にも再度ザンビアに渡航し、コウモリの移動に関するデータを取得する予定です。まだまだ始めたばかりの研究ですが、蓄積されたデータに基づきコウモリの行動をモデル化し、感染症のリスクの高い地域、季節、時間などを予測することができればと思っています。洞窟の周辺に住む地元の人々にとって、この洞窟は土着宗教の信仰対象となっています。また、洞窟内に堆積しているコウモリの糞を肥料にして農業を営み、日々の糧を得ています。現地の人々が大切にしている文化、習慣、生活を奪うことなく人々を感染症から守る。それが本研究の究極の目標です。

弟子入り体験記:

A01 飛龍班からA02 橋本班へ



牛尾 和嵯

同志社大学大学院・生命医科学研究科・修士2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22日~23日に私たちの研究室（飛龍班）から藤岡研究員と私の2人で、東北大学大学院情報科学研究科の橋本浩一教授の研究室に伺いました。飛龍班ではコウモリの飛行戦略解明のため、カメラ撮影された映像データから個体の三次元飛行軌跡を算出することで、定量的な分析を行ってきました。しかし、既存のカメラキャリブレーション手法は、数多くの実験機材を計測地まで運搬する必要がある他、実験系の構築、解析には長時間を要しており、課題となっていました。そこで今回、新たにチェスボードを用いたキャリブレーション手法を学ぶため、対面での弟子入りさせていただきました。

2日間のお時間を割いていただき、橋本先生や伊東さん（修士2年）に実験原理やコードの説明等、一から教わったことで、理解を深めながら計測手法を習得することができました。また、対面ということもあり、多くの質問をさせていただきましたが、専門知識のない私たちにも丁寧に教えていただきました。さらに、コウモリの計測環境下において、この手法を適用

する際の注意点や改善案等も一緒に考えていただき、非常に貴重なご意見をいただくことができたと感じています。

また、今年6月に三重県の廃トンネルで行われたコウモリの集団行動計測の際には、習得したチェスボードのキャリブレーションを実施しました。今後においても、この手法を用いることで、より効率的な計測が可能になると考えています。

改めまして、橋本先生・伊東さん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願いいたします。

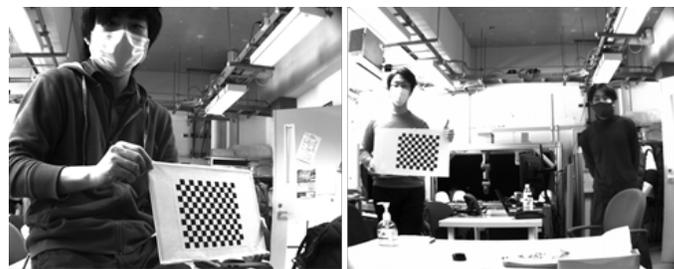


図1 (左) 東北大学・修士2年(当時)・伊東さんにレクチャーしていただいている様子 (右) その後、藤岡研究員と一緒に実践している様子。

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. 2 (2022年8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