

領域略称名：生物移動情報学
領域番号：4803

令和3年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「生物ナビゲーションのシステム科学」

領域設定期間

平成28年度～令和2年度

令和3年6月

領域代表者 東北大学・情報科学研究科・教授・橋本 浩一

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	4

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額	8
4 研究領域の目的及び概要	9
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	11
6 研究目的の達成度及び主な成果	13
7 研究発表の状況	18
8 研究組織の連携体制	23
9 研究費の使用状況	24
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	26
11 若手研究者の育成に関する取組実績	27
12 総括班評価者による評価	28

研究組織

(令和3年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	16H06535 生物ナビゲーションのシステム科学	平成28年度 ～ 令和2年度	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・教授	10
Y00 国	16K21735 生物ナビゲーションのシステム科学（国際活動支援班）	平成28年度 ～ 令和2年度	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・教授	10
A01 計	16H06536 生物ナビゲーションのシステム同定と革新的ロギングデバイスの開発	平成28年度 ～ 令和2年度	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・教授	6
A01 計	16H06537 RTと環境駆動による長寿命・高出力・多機能バイオリロギングシステムの開発	平成28年度 ～ 令和2年度	妻木 勇一	山形大学・大学院理工学研究科・教授	3
A02 計	16H06538 ナビゲーション研究のための統計的データ分析基盤整備とヒト移動データ分析	平成28年度 ～ 令和2年度	竹内 一郎	名古屋工業大学・工学研究科・教授	4
A02 計	16H06539 ナビゲーションにおける知識発見基盤の整備とヒトの屋内位置推定	平成28年度 ～ 令和2年度	前川 卓也	大阪大学・情報科学研究科・准教授	2
A02 計	16H06540 ナビゲーションにおける画像情報分析基盤の整備とヒトの行動分類	平成28年度 ～ 令和2年度	玉木 徹	名古屋工業大学・工学研究科・教授	2
B01 計	16H06541 多次元バイオリロギングによる鳥類・魚類の長距離ナビゲーション行動の包括的理解	平成28年度 ～ 令和2年度	依田 憲	名古屋大学・環境学研究科・教授	3
B01 計	16H06542 コウモリのアクティブセンシングによるナビゲーション行動の包括的理解	平成28年度 ～ 令和2年度	飛龍 志津子	同志社大学・生命医科学部・教授	3
B02 計	16H06543 ラットの神経回路基盤同定による地図記憶参照型ナビゲーションの機能解明	平成28年度 ～ 令和2年度	高橋 晋	同志社大学・脳科学研究科・教授	2
B02 計	16H06544 昆虫の定位型ナビゲーションを実行する全神経回路における計算過程解明	平成28年度 ～ 令和2年度	小川 宏人	北海道大学・理学研究院・教授	2

B02 計	16H06545 線虫の全脳イメージングによる探 索型ナビゲーション神経基盤の解 明	平成 28 年度 ～ 令和 2 年度	木村 幸太郎	名古屋市立大学・大学院理 学研究科・教授	1
総括班・総括班以外の計画研究 計 12 件（廃止を含む）					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	17H05968 地表徘徊性動物のナビゲーション様式の観察のための無限平面装置の開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	岩谷 靖	弘前大学・理工学研究科・准教授	1
A01 公	17H05969 どうぶつタッチ&ゴー：NFC タグ装着の野生動物を誘き出してピットと記録回収する機構	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	小林 博樹	東京大学・空間情報科学研究センター・准教授	1
A01 公	17H05974 長寿命バイオロギングを可能にする振動発電システムの最適設計と実時間最適化	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	山本 茂	金沢大学・フロンティア工学系・教授	1
A02 公	17H05972 低消費電力リアルタイム画像認識実現のためのモバイル深層学習技術	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	柳井 啓司	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	1
A02 公	17H05980 土地鑑のない状況における経路情報収集過程の抽出	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	村尾 和哉	立命館大学・情報理工学部・准教授	1
A02 公	17H05981 大規模群泳行動データセットとインタラクション解析手法の構築	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	波部 斉	近畿大学・理工学部・准教授	1
A02 公	17H05987 超混雑環境における群集ナビゲーションに関する研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	大西 正輝	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長	1
B01 公	17H05971 内的要因および外的要因がツキノワグマのナビゲーションに及ぼす影響評価	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	小池 伸介	東京農工大学・連合農学研究科・准教授	1
B01 公	17H05973 アサギマダラにおける季節性ナビゲーションの神経行動学“生態学的アプローチ”	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	木下 充代	総合研究大学院大学・先端科学研究科・准教授	1
B01 公	17H05975 昆虫のナビゲーションにおける最適戦略の決定メカニズム	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	佐倉 緑	神戸大学・理学研究科・准教授	1
B01 公	17H05976 ナビゲーション能力を制御するゲノム行動生態学的研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	宮竹 貴久	岡山大学・環境生命科学研究科・教授	1

B01 公	17H05979 ヒトとイヌの混合集団によるナビゲーションモデルの構築	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	永澤 美保	麻布大学・獣医学部・講師	1
B01 公	17H05983 南極から北極まで渡る飛翔性海鳥のナビゲーション行動の研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	高橋 晃周	国立極地研究所・研究教育系・准教授	1
B02 公	17H05970 線虫の塩走性行動の包括的理解に向けた全中枢神経活動と行動の高精度同時計測	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	豊島 有	東京大学・大学院理学系研究科・助教	1
B02 公	17H05977 海馬の場所細胞を生成する神経演算原理の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	北西 卓磨	大阪市立大学・大学院医学研究科・講師	1
B02 公	17H05984 ゼブラフィッシュ摂食行動におけるナビゲーション戦略	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	武藤 彩	国立遺伝学研究所・遺伝形質研究系・客員研究員	1
B02 公	17H05985 マウスの社会性ナビゲーションの神経基盤の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	佐藤 正晃	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・客員研究員	1
B02 公	17H05986 Retrosplenial/Hippocampal Circuit Control of Map Selection	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	McHugh Thomas	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー	1
B02 公	17H05988 ターゲット捕獲運動における、運動系神経回路動作様式の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	東島 眞一	大学共同利用機関法人自然科学研究機構・新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・生命創成探究センター・教授	1
A01 公	19H04925 高速動作可能な無限平面装置の開発 公募研究	令和元年度 ～ 令和 2 年度	岩谷 靖	弘前大学・理工学研究科・准教授	1
A01 公	19H04926 光刺激を利用したイヌの長距離ナビゲーションに関する研究	令和元年度 ～ 令和 2 年度	大野 和則	東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授	1
A02 公	19H04929 モバイル深層学習技術を活用した動物ロギングのためのリアルタイム行動認識	令和元年度 ～ 令和 2 年度	柳井 啓司	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	1
A02 公	19H04939 群行動解析のための汎用映像処理プラットフォームの構築	令和元年度 ～ 令和 2 年度	波部 斉	近畿大学・理工学部・准教授	1

A02 公	19H04941 目的志向的な相互作用を含む集団移動系列・経路の解析手法の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	藤井 慶輔	名古屋大学・情報学研究科・助教	1
A02 公	19H04943 超混雑環境における群集移動モデルの構築と安全なナビゲーションに関する研究	令和元年度 ～ 令和2年度	大西 正輝	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長	1
B01 公	19H04927 外洋域におけるサケの産卵回遊ナビゲーション・システムの解明	令和元年度 ～ 令和2年度	北川 貴士	東京大学・大気海洋研究所・准教授	1
B01 公	19H04930 アニマル・インザ・ループによる昆虫の適応的嗅覚ナビゲーション機能の解明と再構成	令和元年度 ～ 令和2年度	志垣 俊介	大阪大学・基礎工学研究科・助教	1
B01 公	19H04932 暗所血糖モニタリングに向けた発電センシング一体型血糖センサ	令和元年度 ～ 令和2年度	新津 葵一	名古屋大学・工学研究科・准教授	1
B01 公	19H04934 経験とコミュニケーションによって形成されるナビゲーションの発現機構	令和元年度 ～ 令和2年度	佐倉 緑	神戸大学・理学研究科・准教授	1
B01 公	19H04936 幾何学モデルによって被食者の多様な逃避方向パターンを統一的に説明できるか？	令和元年度 ～ 令和2年度	河端 雄毅	長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・准教授	1
B01 公	19H04938 「遊動」を予測する：モンゴル草原の環境条件と野生草食獣の移動・活動量の関係	令和元年度 ～ 令和2年度	伊藤 健彦	鳥取大学・国際乾燥地研究教育機構・特命助教	1
B01 公	19H04940 飛行型捕食動物の目標追跡ナビゲーションにおける戦術性の検証と最適な追跡航法の導出	令和元年度 ～ 令和2年度	西海 望	基礎生物学研究所・神経生理学研究室・特別研究員	1
B02 公	19H04928 ナビ行動を生み出す神経情報処理の自由行動 4D イメージングによる解析	令和元年度 ～ 令和2年度	豊島 有	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教	1
B02 公	19H04933 求愛中のショウジョウバエを用いた追跡ナビゲーションを制御する神経機構の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	上川内 あづさ	名古屋大学・理学研究科・教授	1
B02 公	19H04935 アメーバ細胞の自律分散システムによる硬さ感知ナビゲーション	令和元年度 ～ 令和2年度	岩楯 好昭	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授	1

B02 公	19H04937 海馬・嗅内野の空間表象を生成する神経演算原理の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	北西 卓磨	大阪市立大学・大学院医学研究科・講師	1
B02 公	19H04942 マウス社会性ナビゲーションの多感覚仮想環境における再構成とその包括的理解	令和元年度 ～ 令和2年度	佐藤 正晃	北海道大学・医学研究院・講師	1
公募研究 計 37 件（廃止を含む）					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 28 年度	261,300,000 円	201,000,000 円	60,300,000 円
平成 29 年度	295,100,000 円	227,000,000 円	68,100,000 円
平成 30 年度	293,800,000 円	226,000,000 円	67,800,000 円
令和元年度	286,780,000 円	220,600,000 円	66,180,000 円
令和 2 年度	277,330,000 円	212,500,000 円	64,830,000 円
合計	1,414,310,000 円	1,087,100,000 円	327,210,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

【研究の学術的背景】ヒトや動物にとって移動することは最も重要な生命活動の1つである。移動において、適切な経路を選択して目的地に到達することを「ナビゲーション」と呼ぶ。生物学的な研究から、動物の驚異的なナビゲーション能力が明らかになってきた。動物ナビゲーションの問題を解決するためには、ナビゲーション中に動物が感ずるさまざまな外部環境情報を、神経活動を含む動物の内部状態と共に測定し、「どのタイミングにおいて何が重要な情報であるか?」「その情報が神経活動や行動にどのように反映されているか?」などといった情報の重要性と相互の関連性を明らかにすることが必須である。従来は、ヒトや動物の移動を追跡して計測すること自体が困難であった。またそもそもナビゲーションは多様であり、生物種毎の個別の研究に留まっていた。近年になって、超小型GPS、携帯型デバイス、データロガー（記録装置）、大規模神経活動計測装置などの目覚ましい性能向上が実現され、ヒトや動物が行うナビゲーションの詳細な記録が容易になりつつある。しかし、このような「移動ビッグデータ」から重要な情報を抽出し、ナビゲーションの理解・解明に反映させることは依然として困難であり、深刻な問題となっている。

【目標】このような背景のもと、本領域ではナビゲーションをシステム科学的・情報科学的手法により体系的に研究する。すなわち、ヒトや動物の様々なナビゲーションを数理モデルとして理解・解明し、将来的な予測や制御を目指す新たな学問領域を創設する(図1)。この目標のために、制御工学、データ科学、生態学、神経科学の専門家が結集し、動物ナビゲーションを(1)計測、(2)分析、(3)理解(モデル化)、(4)検証、の4つのプロセスによって研究する。

本領域ではこれを、「生物ナビゲーションのシステム科学(略称:生物移動情報学)」と呼ぶ(図2)。体系的なシステム科学的アプローチにより、ヒトや動物に共通するナビゲーション機能の理解・解明に取り組む試みは世界的に見ても例がない。以下にその概要を述べる。

(1) ナビ計測: 先端センサやロガーでヒトや動物の移動、環境情報、体内情報を同時かつ多次元に計測する。GPSにより測定されるのは「どこ」を移動したかであり、「なぜ」そのような移動をしたのかはわからない。「なぜ」を理解・解明するためには移動と共に環境情報(周囲の映像、音など)や体内情報(心拍数、血糖値、神経活動など)を先端的なセンサやロガーを用いて計測する必要がある。本領域ではヒトや動物のナビゲーションを多次元に計測するための工学技術を発展させる。

(2) ナビ分析: ナビ計測によって得られた多次元時系列データを分析し、データ科学的に知識抽出を行うためのソフトウェア基盤を整備する。具体的には、(i)ナビ計測で得られた移動情報から、「エサを探索

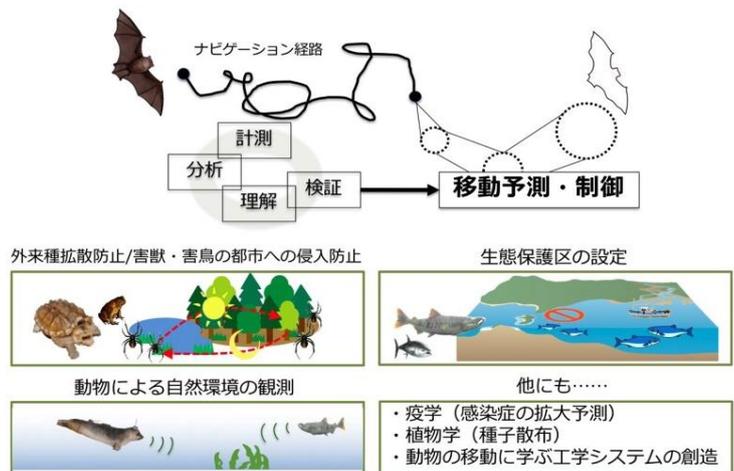


図1 ナビゲーション研究の概要

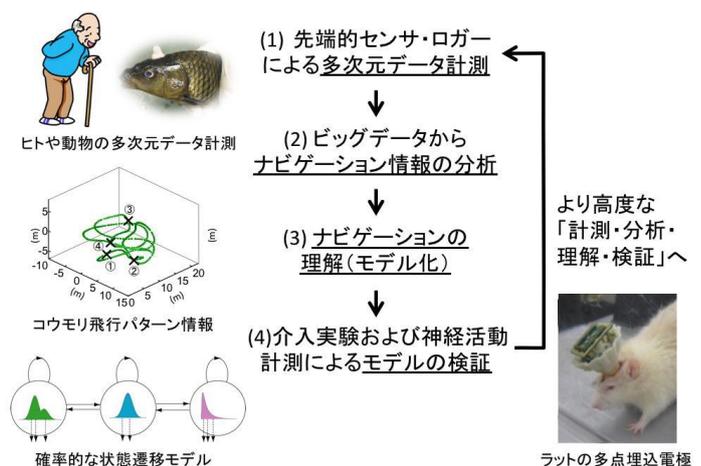


図2 生物ナビゲーションのシステム科学

する」や「逃げる」などの移動パターン・モードを自動的に抽出する技術、(ii)環境や生体内部の情報から「風向きの変化」や「神経活動の変化」など、移動に影響を及ぼすイベントを発見する技術、を開発する。

(3) ナビ理解 (モデル化) : ナビ分析によって得られた移動パターンと環境・生体内部のイベントとの関係を理解するための数理モデルを作成する。動物行動を説明するモデルはこれまでも提唱されてきたが、大規模な定量的データに基づいたモデル作成はほとんど行われていない。ナビ分析から得られたパターン・モード・イベントなどの情報を利用して、入力値と出力値からシステムを数理的に表現する「システム同定」の手法を適用して、ナビゲーションを数理的に表し、そのロジックを見つけるための統一的手法を開発する。すなわち、移動パターン・モード(出力)とその際の環境・生体内部イベント(入力)から、ヒトや動物のナビゲーションを数理モデルとして表現するための方法論を開発する。

(4) ナビモデル検証 : 数理モデルを介入実験と神経活動計測により検証する。分析によって得られた数理モデルの正しさは、実際のナビゲーションへの人為的介入実験の結果が予測と合致するかによって検証できる。また、数理モデルに対応する神経活動が発見されれば、脳が数理モデルと同様の情報処理を行っていたという証拠になる。これらを明らかにするために、(i)動物の移送などによるナビゲーションへの野外介入実験、(ii)ナビゲーション中の実験室内動物への電気生理学および光遺伝学的な神経活動介入実験、および(iii)ナビゲーション中の実験室内動物の大規模神経活動計測による数理モデルとの対応説明、を行う。(光遺伝学:遺伝子操作によって、光刺激で特定の神経活動を操作する手法。)

以上のように、ヒトや動物のナビゲーションの数理モデルを作成・検証する手法を整備する事で、多様に見えるナビゲーションを同一手順で比較する事が可能になる。ナビゲーションは動物固有の感覚器官や運動能力に依存するが、汎用性の高い数理モデルを構築することで、異なる種や異なる移動行動に潜む共通性や多様性の理解が可能になる。さらに、ナビゲーションに共通する数理モデルに基づいた移動予測や効果的な制御方法の考案も可能になる。また、本領域では「計測・分析・理解・検証」サイクルを幾度も繰り返していくことにより、領域としてナビゲーション研究を発展させる。

本領域では「ヒトや動物の移動行動を計測し、分析し、モデルとして理解し、検証する」という研究活動を行う。これは、制御工学、データ科学、生態学、神経科学という既存学問分野だけでは不可能であり、これら4分野が深く融合する事で初めて成立する。本領域「生物移動情報学」終了時には、融合的研究がより一般的な「移動情報科学」という新たな学問分野に発展する(図3)。

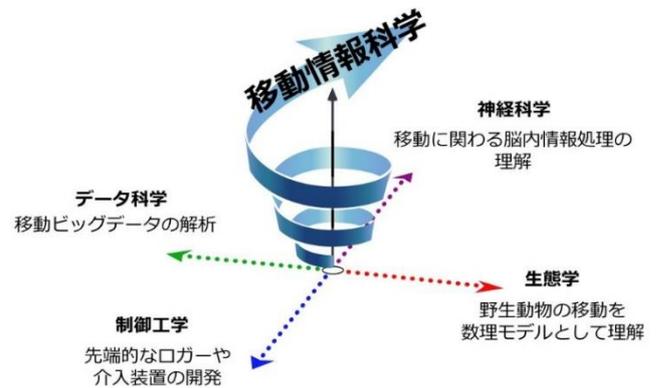


図3 本領域による新たな融合領域の創成

【革新的・創造的な学術研究の発展が期待できる点】 近年、急速に網羅的計測技術とデータ分析技術が向上したことに伴ってデータ駆動型の人工知能によるアプローチが可能となり、さまざまな科学技術分野で変革と革新が起こっている。本領域でもデータ駆動型人工知能アプローチを用いて、動物のナビゲーションに関する研究を統一的に整理・解釈し、飛躍的に発展させることが可能になる。データ駆動型人工知能アプローチには質の高い大量のデータが必要であるが、これは、様々な計測技術や分析技術を専門とする工学研究者と様々な動物種の移動行動を研究する生物学者が分野融合的に研究を発展させる本領域と極めて親和性が高い。本領域は機を捉えた諸外国でも例がない革新的・創造的な大型プロジェクトであり、我が国の学術水準の向上・強化につながる。

【領域設定期間終了後に期待される成果など】 ナビゲーションを理解・解明し、予測・制御が可能になれば、生物資源の有効活用、生物多様性の保全、鳥インフルエンザや蚊が媒介するデング熱など伝染病の拡散防止、害獣の都市への侵入予防、さらには高齢者徘徊や幼児迷子の行動予測(「見守り」)、車やロボットの効率的な走行制御など、重要かつ広範な社会問題の解決への可能性も見込まれる(図1)。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

(審査結果の所見)

本研究領域は、情報学、理工学、生態学、神経科学、数理科学など異なる分野の専門家が連携して生物ナビゲーションを最新の機器・技術の活用により総合的、体系的に研究しようとするものであり、新たな複合領域創成を目指す提案として妥当である。また、国際的にも独創的な研究を進めている複数の研究者が含まれており、発展性が期待できる。本領域研究による成果により、生物の集団行動を予測することで人や環境の調和を実現する指針になり、また自動車運転技術への応用などにつながることも期待され、社会が直面する問題解決に向けた成果の達成が目指されている。

研究組織としては、多くの特色ある研究実績を有する研究者を集めた体制が構築されており、すでに複数の共同研究が開始されている。また、領域代表者は制御工学、ロボティクスの分野で活発に活動しており、十分な実績とリーダーシップ及び人的ネットワークを有することから、マネジメント体制は整っていると判断される。さらに異分野融合のための方策など総括班活動の具体的な立案がなされ、国際コンペの開催など国際的な活動の向上にも努める内容となっている。

一方で、異分野間のバランスのとれた推進計画は評価できるが、得られた成果の普遍的応用を展開するための具体的な研究の立案、公募研究を含めた領域全体における有機的連携やそのためのプラットフォームの構築も検討する必要がある。

・得られた成果の普遍的応用を展開するための具体的な研究の立案

齧歯類や線虫などのモデル動物に加えて、生物移動情報学の目的に合致したモデル動物を用いた生態・神経科学的研究を立案し、新しい知見を得て、論文化するところまで行うことにより、普遍的応用のためのロードマップを示した。例えば、海鳥類をモデルにログボット(ロギングロボット)を使った生態学的研究を立案し、論文化することにより、公募班の研究者が対象とするクマやイヌなど幅広い動物への適用が円滑に進んだ。

・公募研究を含めた研究領域全体における有機的連携・そのためのプラットフォームの構築

若手育成、融合研究、共通基盤技術を領域運営の3本柱として位置付け、研究領域全体における有機的連携をはかった。若手が夜通し議論する若手合宿や、共同研究先に長期滞在する弟子入りを頻繁に行ったほか、計画班・公募班の研究者で書籍を執筆することにより、共同で取り組む課題を明確にした(「生物の科学 遺伝」特集「生物のナビゲーションを科学する」および連載「生物のナビゲーションに学ぶ」2017年11月号～2020年11月号)。また、共通基盤技術として、ログボット(Korpela et al., *Comm Biol* 2020)と移動解析プラットフォームDeepHL(Maekawa et al., *Nat Comm* 2020)を開発し、領域の内外で広く共有した。

(留意事項)

・生物ナビゲーションのロギング機器開発とデータ解析・画像情報分析に重点が置かれているが、生物ナビゲーションを数理モデル化し、普遍的な応用へ展開するための研究は具体性に欠けると考えられるため、より検討を加える必要がある。また、領域代表者の専門分野から考えて、特に生態学と神経科学の理論やモデルの構築の面においては関連分野の研究者とも十分連携して研究を遂行することが求められる。

・工学系分野と生態学分野など、各分野間の有機的連携の具体的な方法が不明瞭であることに加え、公募研究との連携も推進するため、ナビゲーション計測・解析のプラットフォーム構築が必要である。

・生物ナビゲーションを数理モデル化し、普遍的な応用へと展開するための研究

生物ナビゲーションは、主体と他個体、そして外部環境との継続的な相互作用が底流となり生み出される。そこで、外的要因、運動能力、ナビ能力(目的地を認識する能力)、内的状態(空腹状態や神経活動)などの各要素の連動が生物ナビゲーションを生み出すことを表現するフローチャートを用いて、数理モデルや機械学習モデルの設計に用いた(Tanimoto et al., *eLife* 2017; Goto et al., *Sci Adv* 2017; Hirakawa et al., *Ecosphere* 2018等)。これにより、現実的で柔軟な移動モデルの作成が可能になった。

・生態学と神経科学の連携

神経科学者が生態学のフィールドに足を運び、コントロールの難しい屋外で脳内メカニズムを計測する手法の開発に取り組んだ。また、神経科学者が日本生態学会で、生態学者が日本神経科学学会での講演を行い、異分野の情報や経験を共有して、理論やモデルの構築に活かした。その結果、行動中の海鳥やサケ科魚類の脳内から神経細胞活動を無線計測する手法を世界にさきがけて確立し(Takahashi et al., *Anim Biotelemetry* 2021)、ナビゲーションに関連する頭方位細胞などを発見した。この異分野融合研究により、屋外の生態学と実験室内の神経科学の有機的連携が可能になり、長距離ナビゲーションに関する新しい理論の構築に繋がった。

・ナビゲーション計測・解析のプラットフォーム構築

工学・情報学を専門とする領域代表が、生態班と神経科学班の各リーダーと密に連携することにより、異分野間の共同研究を促進した。上述したログボットや DeepHL に加え、広く鳥類に対して使えるロガー切り離し装置(Abe et al., *Adv Robotics* 2021)や、昆虫類・鳥類・線虫などの幅広い生物分類群に適用可能な経路解析手法(Sakuma et al., *Adv Robotics* 2019; Ardakani et al., *Adv Robotics* 2019)などを開発し、領域内外で成果を利用できるようにした。

科学研究費補助金審査部会における所見

A (研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる)

本研究領域は、動物が正確に目的地へと到達する機構(ナビゲーションシステム)を理解・解明し、その予測・制御を可能にすることを目指す。そのために、制御工学・データ科学・生態学・神経科学の専門家が結集し連携して研究を進めている。既に高機能・高汎用性の小型行動記録装置「ログボット」の開発がなされているのに加えて、機械学習による解析ソフトの確立、野外及び実験室での各種動物の行動データ取得、数理モデルの作成など、この2年間で活発な融合研究が行われている。今後、それらが公募研究も含めた研究領域内で更に広く共有され、得られた結果がフィードバックされることで、より研究が進展することが期待できる。

領域運営では、計測・分析・理解・検証サイクルを軸に研究を推進する計画研究の上に公募研究が有機的に加わっており、さらに研究項目間の連携も強く進められて有効に働いている。研究領域内での講習会や勉強会、弟子入り制度など、連携や融合、若手研究者育成を推進する具体的な仕組みを積極的に行っていることも評価できる。

国際的な位置付けに関しては、この分野において融合研究を推し進めているという点で世界をリードしていると思われるが、個別研究については、今後更なる世界的な成果が求められる。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

中間評価ではナビゲーションを測定・解析するための数々の独自技術の開発や、活発な融合研究が評価され、「A」評価を受けた。一方で、以下の2つの点について指摘を受けたため、総括班を中心に議論を行い、研究期間後半に対応した。

・公募研究も含めた研究領域内での共有技術

本領域後半では、ログボット(Korpela et al., *Comm Biol* 2020)や AI による解析手法等(DeepHL: Maekawa et al., *Nat Comm* 2020; STEFTR: Yamazaki et al., *Front Neurosci* 2019)等、ナビゲーションを計測・解析する多数の技術を、複数分野の計画班・公募班の共著論文として発表することに成功した。ログボットは生態班とデータ科学班、AI による解析ソフトは神経・生態・データ科学・工学班・公募班による異分野融合研究が結実した成果である。特に DeepHL は誰でも使えるように広く公開し、マニュアルなどを各所で紹介することで(例:日本バイオロギング研究会会報 No. 175)、領域内外で成果が利用されている。

・個別研究の世界的成果

中間評価では異分野融合研究が高く評価されていたが、個別研究については世界的な成果を期待されていた。そこで、各分野におけるトップカンファレンスやトップジャーナルでも成果を発表することを目指し、数多くの成果を得た(A01 工学・A02 情報学:Maekawa et al., *Nat Commun* 2020, Duy et al., *NeurIPS* 2020; B01 生態学: Yamamoto et al., *Curr Biol* 2019, Yoda et al., *Ecology* 2021; B02 神経科学:Voleti et al., *Nat Meth* 2019, Sato et al., *Cell Rep* 2020, Ishimoto et al., *Curr Biol* 2020, Kitanishi et al., *Sci Adv* 2021, Wen et al., *eLife* 2021)。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

【研究項目 A01 制御工学】

達成目標: 従来は不可能であった、様々な小動物に装着し、継続的にデータ取得またはフィードバック介入を行うことが可能な革新的ナビゲーション解析デバイス群を開発する。

達成した成果: 最先端の小型多次元センサデバイスであるログボットのハードウェア開発を行い、A02 や B01 班との共同研究により、海鳥やクマなどへの適用を実現した。ログボットはカメラや GPS などのマルチモーダルセンサに加えて省電力なマイコンを備え、デバイス上での高度なセンサ処理によるイベント駆動を可能とする世界で初めてのデバイスである。*Nature Ecology & Evolution Community* に、紹介記事「AI-assisted Bio-logging」(<https://natureecoevocommunity.nature.com/posts/ai-assisted-bio-logging>) が掲載されたことは、本領域の代表的な活動に関する国際的な注目度を表している。また、ドローンを用いたロガー装着システムとクジラ用ローバーを開発した。さらに海鳥用に火薬を用いない 10g 以下の無線式ロガー分離装置を開発した。以上の取り組みにより、Journal of Robotics and Mechatronics や Advanced Robotics などの成果(詳細は(2)参照)に繋がった。

【研究項目 A02 データ科学】

達成目標: 計測された長期間・高頻度な移動、環境、生体情報から、移動パターンの切り出しや特異的なイベント(環境や体内情報の変化)の自動検出を行うための信号処理技術を開発する。

達成した成果: 計測された多次元移動情報からのデータ駆動型分析プラットフォーム群を開発し、本領域で得られた様々な動物種のデータに適用した。移動に関する単純なイベントの検出手法に加え、統計的信頼度を保証した軌跡データからのデータマイニング手法、説明可能な深層学習を用いた軌跡データの分析支援技術、逆強化学習を用いた動物の内的な報酬関数推定手法などを開発することにより、専門家の予備知識無しでも、時空間スケールに依存せずに多数の動物種の移動行動を統一的に解析し、かつ網羅的な検討から行動の特徴を効率的に発見する手法が組織的に整備された。以上の取り組みにより、NeurIPS、IEEE TKDE、Nature Communications などの成果に繋がった。

【研究項目 B01 生態学】

達成目標: さまざまな生物の環境情報や体内情報を入力とし、行動・移動を出力とする動的システムとしてナビゲーションモデルを捉え、その同定を行うための方法論を確立する。

達成した成果: A01、A02 班による最先端の技術開発と連携することで、昆虫、魚類、鳥類、哺乳類(コウモリ、イヌ、クマ)など数十にわたる多様なナビゲーション行動を大規模に計測、分析し、その結果、生態学的に重要な新たな発見を数多く得ることができた。A01 班で開発されたログボットが、潜水する海鳥から山林の熊、また飛行するコウモリなど、動物種固有の幅広いニーズに対応した計測に展開可能であることを実証し、バイオロギング研究に大きなインパクトを与えた。一方、A02 班と共同した逆強化学習による動物の移動経路予測や、捕食者-被食者間にみられる追跡・逃避戦術など数理モデルとして生物ナビゲーションを理解する取り組みにも成功し、野外から実験室内の動物のナビゲーションデータの取得からモデル化まで、その方法論を実践と共に確立することができた。以上の取り組みにより、Current Biology や Communications Biology などの成果に繋がった。

【研究項目 B02 神経科学】

達成目標: 動物のナビゲーションの神経基盤を明らかにするために、動物の行動と神経活動を同時に計測する実験系を構築し、データ駆動型の解析によってナビゲーションに特徴的な行動や神経活動を抽出し、モデル化する。さらにモデルを検証するために、電気生理学的または光遺伝学的手法による神経活動介入を行う。

達成した成果: A01、A02、B01 班との協力などのもと、行動と神経活動の同時計測のための実験系および介入のための実験系を多数開発した。これによる線虫ナビゲーション中の意思決定のための遺伝子の解明や遊泳中のサケ科魚類の神経活動計測などは画期的な成果である。さらに、機械学習を用いた軌跡の比較分析手法などを多数開発し、従来では得られなかったさまざまな「ナビゲーションのための行動の特徴」が容易に解明できるようになった。以上の取り組みにより、Nature Neuroscience, Nature Methods, Science Advances, PNAS, eLife, Animal Biotelemetry などの成果に繋がった。

(2) 本研究領域により得られた成果

【研究項目 A01 制御工学：計画班】

研究項目 A01 での取り組みは、主にログボット(多次元高機能データロガー)のハードウェア開発、ロガー装着システムとローバー開発などから成る。以下にこれらの成果を紹介する。

[マルチモーダルログボットハードウェアの開発：A01 橋本班] カメラ、加速度計、位置センサ(GPS)、マイク、サチュレーションなどのマルチモーダルなセンサを搭載した超小型プログラマブルログボットを開発し、A02 前川、B01 依田、B02 飛龍などと共同してフィールドワークを実施した。得られた成果については各班の成果参照。

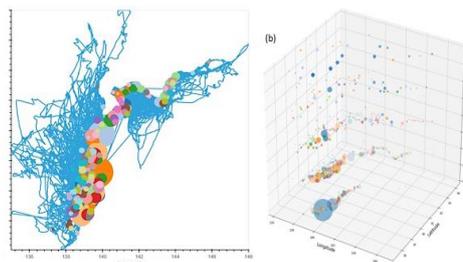


図4：トラジェクトリ、キーポイント、地理情報の意味

[トラジェクトリマイニングアルゴリズム開発：A01 橋本班]

動物の移動トラジェクトリをキーポイントのベクトルで表現することにより、環境の変化を検出し、個体間で共有される地理情報の意味を分析する手法を提案した。さらに、運動能力と地理的特徴を事前情報として学習することで、移動の予測を可能としている(図4: Ardakani et al., Adv Robotics 2019)。

[新しいバイオリギング技術の開発：A01 妻木班] ドローンを用いたロガー装着システムとクジラ用ローバーを開発した。2019 年度に初めてクジラ用ローバーをマッコウクジラへ投下・吸着させ、2020 年度には 19 回投下し、内 13 回の吸着を実現したことから、ドローンを用いた投下・吸着技術は確立されたと言える。また、海鳥用の火薬を用いない 10g 以下の無線式ロガー分離装置を開発した(図5: Abe et al., J. Robot Mechatron 2021)。



図5：ドローンによる投下(左)と吸着したローバー(右)

【研究項目 A01：公募班】

A01 公募岩谷班では、虫などの小型生物の位置と移動方向を計測可能な球形レッドミルを用いた高速無限平面装置を開発した。既存の装置では、観測対象にマーカを必要としたが、本研究で開発した装置はマーカを必要とせず移動方向まで計測可能である。装置の評価実験を、B02 小川班らと共にコオロギなどを用いて行い、その性能を確認した(図6: Iwatani et al., Adv Robot 2019)。

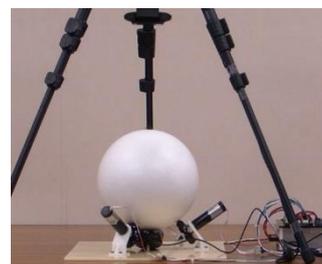


図6：球形高速ビジュアルサーボ

【研究項目 A02 データ科学：計画班】

研究項目 A02 での取り組みは、主に軌跡データ分析プラットフォームの開発と、動物移動データの収集手法の開発などから成る。以下に、これらの成果を紹介する。

[統計的信頼性保証付き軌跡マイニング法の開発：A02 竹内班] 二群の軌跡データから群間で統計的に有意差のある部分系列を検出する統計的軌跡マイニング法を開発した。軌跡マイニングからの知識抽出では仮説の爆発によって正確に誤検出率

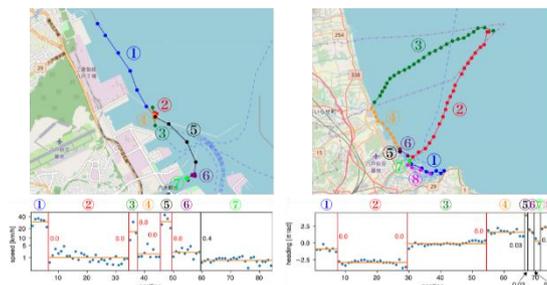


図7：統計的信頼性保証付き変化点検知

を制御することができなかったが、分子限定法と多重検定補正を統合させることにより、正確な統計的信頼性評価がはじめて可能となった (図 7: Duy et al., IEEE TKDE 2020)。

[統計的信頼性保証付き系列変化点検出法の開発 : A02 竹内班] 動的計画法によって検出された系列変化点の統計的信頼性を定量化する統計分析方を開発した。動的計画法などのアルゴリズムによって検出された変化点は選択バイアスを有するため、正確に誤検出率を制御することができなかったが、選択的推論の枠組を活用することにより、正確な統計的信頼性評価がはじめて可能となった (Duy et al., NeurIPS 2020)。

[人工知能搭載型ログボットの開発 : A02 前川班] 低消費電力なセンサのみを用いて動物の行動をログボット上で自動認識し、生態学者が興味のある行動が発生しているときのみ高消費電力なカメラなどを起動して集中的に観測を行う、人工知能搭載型ログボットを開発した。A01 橋本班、B01 依田班との共同研究によって、飛翔中の鳥による昆虫食など全く予想されなかった動物の生態を明らかにすることができた (図 8: Korpela et al., Commun Biol 2020)。



図 8 : 人工知能搭載型ログボットによる海鳥の行動観測

[説明可能深層学習を用いた動物移動軌跡の分析支援手法の開発 : A02 前川班] 大量の生物の移動軌跡の比較分析支援を行うプラットフォームを開発した。説明可能深層学習モデルに大量の軌跡データを入力するだけで、比較群に特徴的な部分軌跡を検出して知識発見の支援を行うことができる。B01 依田班、B02 木村班、B02 高橋班、B02 小川班、B01 公募小池班、B02 公募宮竹班らと共に、6 種の動物の移動行動分析を行い、海鳥の雌雄の飛翔パターンの違いや、パーキンソン病モデルマウスの新たな異常指標など、従来は全く得られていなかった知見が半自動的に得られた (Maekawa et al., Nat Commun 2020)。

[GPS 軌跡の欠損経路確率分布推定手法の開発 : A02 玉木班] B01 依田班から提供された海鳥の GPU 経路データを学習し、目的地までに至る経路を予測するための逆強化学習を利用した手法を開発した。これにより、移動環境の情報が全く得られなくとも、動物が環境中のどのような情報を重視しているかを推定することが初めて可能になった (図 9: Hirakawa et al., Ecosphere 2018)。



図 9 : (左) 欠損を含む経路 (右) 推定経路の確

この手法は膨大な計算量を必要とする逆強化学習に基づくため、LSTM に基づく軽量な手法を開発した (Ogawa et al., FCV 2019)。

[移動軌跡のクラスタリングと分割手法の開発 : A02 玉木班] 映像中の人物移動軌跡をいくつかのグループに分け、歩行目的地に応じて分割する手法を開発した。これはベイズ推定の枠組みで定式化されており、分割された軌跡のそれぞれの目的地を推定することで、人物歩行軌跡の定性的な解析が可能になった (図 10: Tamaki et al., Adv Robot 2019)。



図 10 : 予測された目的地

【研究項目 A02 データ科学 : 公募班】

A02 公募大西班では、大規模イベントにおける人流予測の予測手法を開発した。一般的に大規模イベントで大量データを収集することは困難である。提案手法では、人流量のパターンの基底を Non-negative matrix factorization によりあらかじめ取得しておき、それらの重ね合わせにより人流を予測するアプローチを採用することで、少量学習データでの予測を可能とした。サッカー競技場での人流データを用いて提案手法を評価し、その有効性を確認した (図 11: Okukubo et al., AAI-21 2021)。

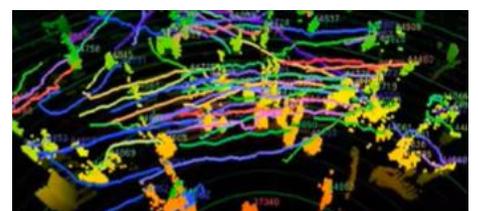


図 11 : サッカー競技場における人

【研究項目 B01 生態学：計画班】

研究項目 B01 での取り組みは、主に野外や実験室内動物の高度なナビゲーションデータの取得、生態学的新たな知見の発見、数理モデルによるナビゲーションの理解などから成る。以下にこれらの成果を紹介する。

【海鳥類とサケ科魚類のナビゲーションの解明のための技術開発：B01 依田班】A01・A02 と連携し、多次元計測・イベント駆動機構を備えたログボットを開発し (Korpela et al., *Comm Biol* 2020)、B01 公募班と共同して、海鳥の新しい行動発見に活用した (水谷他、*日本鳥学会誌* 2021)。また、ロガーを効率的に回収するシステムや (A01 妻木班との共同研究; Abe et al., *Adv Robotics* 2021)、野生動物の頭部への電極留置技術 (B02 高橋班との共同研究; Takahashi et al., *Anim Biotel* 2021)を開発した。

【海鳥類とサケ科魚類の長距離ナビゲーションの解明：B01 依田班】数百個体の野生動物に対してバイオリギングを行い、世界的に見ても類を見ない移動ビッグデータ (GPS・照度・深度・加速度・ビデオ・心電図・照度など)を得て、動物のナビゲーション能力の獲得過程や地理的障壁などを明らかにした。例えば、親鳥は全く陸上を移動しないのに、幼鳥は本州中央の山脈を越えて南下するという完全に予想外の現象を発見した (図 12: Yoda et al., *Curr Biol* 2017; Yoda et al., *Ecology* 2021)。また、移動中に用いる感覚や手がかりを推定するために、ロガーを装着した動物を人為的に数 km 移動して放す環境介入実験を行った (Shiomi et al. 2019)。A01・A02 と連携し、データ駆動型モデルおよび知識駆動型モデルを作成し、経路の特徴抽出や移動する動物の認知過程の推定を行った (Goto et al., *Sci Adv* 2017; Yamazaki et al. *Front Neurosci* 2019; Sakuma et al., *Adv Robot* 2019; Ardakani et al. *Adv Robt* 2019 等)。

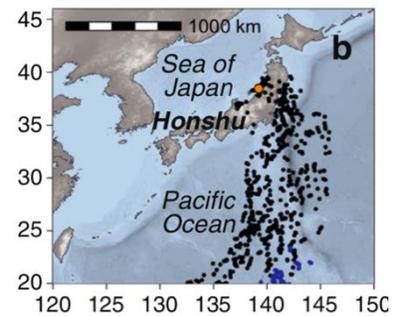


図 12: 山を越える海鳥の行動を発見

【コウモリの集団ナビゲーションの解明：B01 飛龍班】超小型テレメトリマイクロホンを独自に開発し、実験室内で飛行するコウモリが互いの超音波の周波数を変化させるという高度なアクティブセンシングを用いて集団行動を行うことを見出した (図 13 左: Hase et al., *Commun Biol* 2018)。

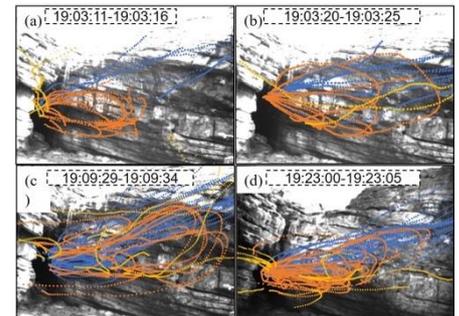
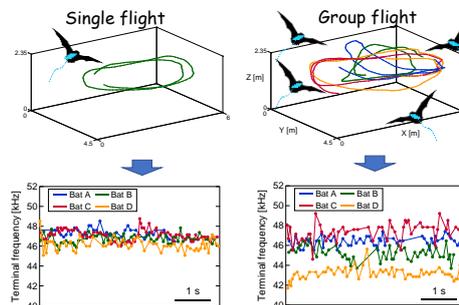


図 13: コウモリの周波数調整行動 (左) と集団出巢するコウモリの行動分類 (右)

また、A02 波部班と共同研究として機械学習を用いた画像解析を行うことにより、野外環境下で集団出巢するコウモリの行動分類や個体数調査などが可能となった (図 13 右: Fujioka et al., *J Robot Mechanotron* 2021)。

【エコーロケーションコウモリの国内初バイオリギング調査：B01 飛龍班】

エコーロケーションを行う小コウモリに対して国内初となるバイオリギング調査を実施し、独自に開発した音響 GPS ロガーによるデータ収集にも成功した。A02 前川班と共同で GPS データの分析を進め、それらの成果は International Berlin Bat Meeting などでも発表し、現在投稿準備中である。

【研究項目 B01 生態学：公募班】

A02 前川班、A01 橋本班によって開発されたログボットや先端的なデバイスを用いることで、野生のクマ (図 14: B01 公募小池班) などからこれまでに無いデータが得ることができた。またログボットが取得した映像には、海上飛翔中のウミネコが昆虫を捕食する瞬間がとらえられており、貴重な野生動物の新たな生態の発見に大きく貢献を果たした (B01 公募宮竹班



図 14: (左) 動物園でのツキノワグマへのログボット装着実験、(右) 首輪型ケースにログボットを収納。麻酔で眠らせて装着

と共同; 水谷他、日本鳥学会誌 2021)。さらに B01 公募高橋班をはじめ公募班メンバーが所有する様々な野生動物の移動データを A02 前川班や B02 木村班と共有することで、新しい分析手法から行動モデルの開発にも取り組んだ(Maekawa et al., Nat Comm 2020; Yamazaki et al., Front Neurosci 2019 等)。また B01 公募北川班は B02 高橋班と共同でサケ科魚類の神経活動計測にも成功した(Takahashi et al., Anim Biotel 2021)。

【研究項目 B02 神経科学：計画班】

研究項目 B02 での取り組みは、主にナビゲーション中の動物から行動と神経活動を同時に計測する実験系を構築し、重要な特徴を抽出してモデル化、さらにモデルの検証を実験的に行うことなどから成る。以下に主な成果を紹介する。

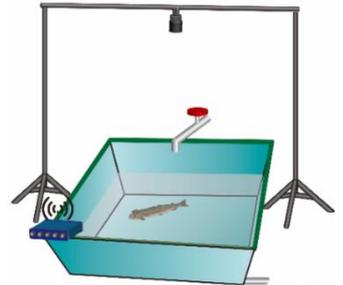


図 15: (上) 計測システム、(下) ロガーを装着して遊泳するサケ

【野生動物の脳活動計測と新知見の発見：B02 高橋班】

野生動物の脳活動を計測可能な無線神経ロガー・システムを開発し、遊泳中のニジマス(サケ科魚類)の脳内から頭方位細胞を発見した(図 15: B01 依田班との共同研究; Takahashi et al., Anim Biotel 2021)。加えて、歩行中のオオミズナギドリ雛の終脳背内側後部から頭方位細胞などを発見した。この成果は、神経科学学会、生態学会などで発表し、現在審査中である(B01 依田班との共同研究)。

【多感覚 VR 装置等を使用した環境操作によるコオロギ音源定位ナビゲーションの解析：B02 小川班】

動物の運動や位置に応じた音響刺激(誘引歌)を操作することにより、メスコオロギのオス誘引歌への音源定位ナビゲーションが単に外的刺激に対する反射的運動の連鎖によって起こるのではなく、内的状態によってその行動ステージが変化することを発見した(B01 飛龍班との共同研究; Hommaru et al., J Exp Biol 2020)。また、聴覚バーチャルリアリティ(VR)装置を開発し(図 16: Ando et al., J Robot Mechatron 2021)、さらにそれに視覚刺激を組み合わせることにより、環境に応じた感覚手掛かりの使い分けや、脳内中心複合体領域の神経活動による外部感覚入力と自己運動フィードバック情報の統合処理について明らかにした。

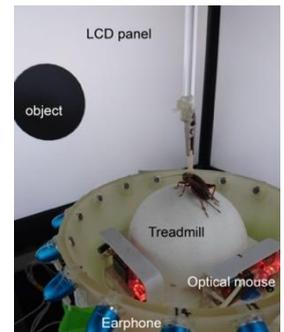
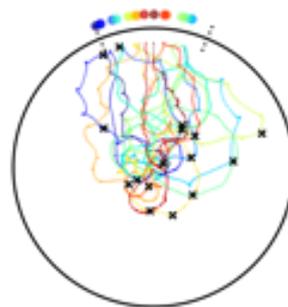


図 16: (左) 音源定位の軌跡 (×は行動状態の遷移点)、(右) 図 多感覚 VR 装置上のコオロギ

【ロボット顕微鏡による線虫の刺激～神経活動～行動の関連の解明：B02 木村班】

A01 橋本班との共同研究として、人工的な匂い刺激を制御しながら線虫 *C. エレガンス*の行動を自動追跡して特定の神経細胞活動を計測、さらには光刺激での神経活動制御でモデルを検証するロボット顕微鏡 OSaCaBeN2を開発した。これにより、線虫が忌避匂いに対する行動の向きを正しく選択し、この際に感覚刺激情報を時間積分することで「意思決定」を行っていることを発見した(Tanimoto et al., eLife 2017)。また、線虫の行動状態を軌跡から推定するための機械学習手法を A02 前川班と共同開発し、これを発展させることで B01 依田班(海鳥)、飛龍班(コウモリ)、高橋班(ペンギン)、B02 北西班(ラット)、上川内班(シウジョウバエ)との共同研究として、さまざまな動物種の行動を時空間スケール非依存的に解析するデータ駆動型分析ソフトとして確立した(Yamazaki et al., Front Neurosci 2019; 木村が責任著者)。

【研究項目 B02 神経科学：公募班】

神経科学分野は一つの研究成果を論文として発表するのに数年掛かることが一般的である。その中でもさらに実験が困難なマウスを使った3つ公募班から、ナビゲーションと神経活動に関する論文が国際的なハイインパクトジャーナルにそれぞれ論文が掲載されたことは(McHugh 班, Nature Neuroscience 2017; 北西班 Science Advances 2021; 佐藤班 Cell reports 2020)、優秀な研究者に本領域に加わっていただけたことを示している。その他にも、B02 の公募班のデータと A02 計画班のデータ駆動型分析との融合研究により、新たな「行動の特徴」を明らかにすることなどができた(上述 Maekawa et al., Nat Commun 2020 など)。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和3年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

<発表論文>

研究項目 A01

【計画班 橋本浩一】

雑誌論文

Chiba K., Takahashi H., Chen M., Obinata H., Arai S., Hashimoto K., Oda T., McKenney R. J., *Niwa S. (2019) Disease-associated mutations hyperactivate KIF1A motility and anterograde axonal transport of synaptic vesicle precursors PNAS 116: 18429-18434. 査読有

*Kagami S., Hashimoto K., (2019) Animated Stickies: Fast Video Projection Mapping onto a Markerless Plane through a Direct Closed-Loop Alignment, IEEE Trans. Vis. Com. Grap. 25(11). 査読有

*Ardakani, I., Hashimoto K., Yoda K. (2019) Context-based semantical vector representations for animal trajectories. Advanced Robotics 33(3-4). 査読有

*Li, M. & Hashimoto, K. (2017) Accurate object pose estimation using depth only. Sensors 18(4). 査読有

Gengyo-Ando, K., Kagawa-Nagamura, Y., Ohkura, M., Fei, X., Chen, M., Hashimoto, K., *Nakai, J. (2017) A new platform for long-term tracking and recording of neural activity and simultaneous optogenetic control in freely behaving *Caenorhabditis elegans*. Journal of Neuroscience Methods 286, 56-68. 査読有

【計画班 妻木勇一】

学会発表

Murakami, R., Toyoshima, T., Furusawa, D., Suzuki, M., Masumoto, K., Owada, S., *Tsumaki, Y., Mori, K. (2021) Logger Attaching System for Sperm Whales Using a Drone, J. of Robotics and Mechatronics 33(3), 475-483. 査読有

Abe, T., Kubo, N., Abe, K., Suzuki, H., Mizutani, Y., Yoda, K., *Tadakuma, R., Tsumaki, Y., (2021) Development of Data Logger Separator for Bio-logging of Wild Seabirds, J. of Robotics and Mechatronics, 33(3), 446-456. 査読有

Abe, T., Kubo, N., Suzuki, H., Yoda, K., *Tadakuma, R., Tsumaki, Y., (2020) Study on hypercompact and lightweight data logger separators for wild animals, Advanced Robotics 35(2). 査読有

*Tsuchiya, K., Tsumaki, Y., Mori, K., Okamoto, R. (2019) Whale rover moving along the surface of sperm whale, Advanced Robotics, 33(3). 査読有

*Tsuchiya, K., Suzuki, A., Tsumaki, Y., Mori, K. (2018) Whale rover for bio-logging. Proc. of IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics. 査読有

【公募班第1・2期 岩谷靖】

雑誌発表

*Iwatani, Y., Ogawa, H., Shidara H., Sakura, M., Sato, T., Hojo,

M. K., Honma, A., and Tsurui-Sato, K. (2019). Markerless visual servo control of a servosphere for behavior observation of a variety of wandering animals. Advanced Robotics, Vol. 33, No. 3-4, pp. 183-194. 査読有.

学会発表

*Iwatani, Y. (2021) High-speed servosphere. IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 613-618. 査読有

【公募班第1期 小林博樹】

雑誌論文

*Kobayashi, H. H., Kudo, H., Glotin, H., Roger, V., Poupard, M., Shimotoku, D., Fujiwara, A., Nakamura, K., Saito, K., Sezaki, K. A. (2018) Real-time streaming and detection system for bio-acoustic ecological studies after the Fukushima accident. Multimedia Tools and Applications for Environmental & Biodiversity Informatics. Multimedia Systems and Applications. 査読有

学会発表

*小林博樹, 榎田篤哉, 永澤美保, 菊水健史, 工藤宏美. (2017) どうぶつタッチ&ゴー:NFC タグ装着の野生動物を誘き出してピットと記録回収する機構 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会. 査読無

【公募班第1期 山本茂】

学会発表

Take, T., Kindaichi, Y., and *Yamamoto, S. (2018): Output power maximization of a vibration power generation system by extremum seeking control, Symposium on Systems Science of Bio-Navigation 2018. 査読無

武達也, *山本茂, 上野敏幸 (2018) 可変キャパシタンスと極値探索制御による加振周波数変動下での振動発電出力最大化, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 査読無

【公募班第2期 大野和則】

雑誌論文

*Nishinoma, H., Ohno, K., Kikusui, T., Nagasawa M., Tsuchihashi N., Matsushita, S., Mikayama, T., Tomori, S., Saito, M., Murayama, M., Tadokoro, S. (2019) Canine Motion Control using Bright Spotlight Devices Mounted on a Suit, IEEE TMRB, 1(3), pp. 189-198. 査読有

*Beokhaimook, C., Ohno, K., Westfechtel, T., Nishinoma, H., Tamura, R., Tadokoro, S. (2020) Cyber-enhanced canine suit with wide-view angle for three-dimensional LiDAR SLAM for indoor environments, Advanced Robotics, 34(11), pp. 715-729. 査読有

研究項目 A02

【計画班 竹内一郎】

雑誌論文

*Inoue K., Karasuyama M., Nakamura R., Konno M., Yamada D., Mannen K. Nagata T., Inatsu Y., Yawo H., Yura K., Béjà O., Kandori H., *Takeuchi I. (2021) Exploration of natural red-shifted rhodopsins using a machine learning-based Bayesian experimental design. Communication Biology. Communication Biology. Vol. 4, Article Number 362. 査読有

Duy N.L.V., Sakuma T., Ishiyama T., Toda H., Arai K., Karasuyama M., Okubo Y., Sunaga M., Hanada H., Tabei Y.,

*Takeuchi I. (2020) Stat-DSM: Statistically Discriminative Sub-trajectory Mining with Multiple Testing Correction. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (TKDE). Early Access. 査読有

Sakuma T., Nishi K., Kishimoto K., Nakagawa K., Karasuyama M., Umezaki Y., Kajioka S., Yamazaki S.J., Kimura K.D., Matsumoto S., Yoda K., Fukutomi M., Shidara H., Ogawa H. and *Takeuchi I. (2019) Efficient learning algorithm for sparse subsequence pattern-based classification and applications to comparative animal trajectory data analysis. Advanced Robotics.

vol.33, pp.134-152. 査読有

学会発表

Duy N.L.V., Toda H., Sugiyama R., *Takeuchi I. (2020) Computing Valid p-value for Optimal Changeoint by Selective Inference using Dynamic Programming. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS2020). 査読有
Ndiaye Y., Le T., Fercoq O., Salmon J., *Takeuchi I. (2019) Safe Grid Search with Optimal Complexity. Proceedings of Machine Learning Research (ICML2019) Vol.97, pp.4771-4780. 査読有
【計画班 前川卓也】

雑誌論文

*Maekawa T.,..., Koike S., Miyatake T., Kimura K., Ogawa H., Takahashi S., Yoda K. (2020) Deep Learning-assisted Comparative Analysis of Animal Trajectories with DeepHL, Nature Communications 11: 5316. 査読有
Korpela, J.,..., *Maekawa T., Nakai J., Yoda K. (2020) Machine learning enables improved runtime and precision for bio-loggers on seabirds, Communications Biology, 3: 633. 査読有
Xia, Q., Korpela, J., Namioka, Y., *Maekawa T. (2020) Robust Unsupervised Factory Activity Recognition with Body-worn Accelerometer Using Temporal Structure of Multiple Sensor Data Motifs, Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT) 4 (3) 査読有
田一鳴, *前川卓也, 天方大地, 原隆浩, 松本祥子, 依田憲, 藤岡慧明, 濱井郁弥, 福井大, 飛龍志津子 (2020) マルチモーダル移動行動データからの高速な頻出共起ルール抽出手法, 情報処理学会論文誌 60 (3) 査読有
Xia, Q., Wada, A., Korpela, Y., *Maekawa T., J., Namioka (2019) Unsupervised Factory Activity Recognition With Wearable Sensors Using Process Instruction Information, Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT) 3 (2) 査読有

【計画班 玉木徹】

雑誌論文

*箕浦大晃, 平川翼, 山下隆義, 藤吉弘亘 (2020) 移動対象の属性と環境情報を導入した LSTM による経路予測, 精密工学会誌, 86(12), 961-968. 査読有
*平川翼, 山下隆義, 玉木徹, 藤吉弘亘 (2019) 動画像を用いた経路予測手法の分類, 電子情報通信学会論文誌 D, J102-D(2):53-67, 査読有
*Tamaki T., Ogawa D., Raytchev B., Kaneda K. (2019) Semantic segmentation of trajectories with improved agent models for pedestrian behavior analysis, Advanced Robotics, 33(3-4):153-168. 査読有
*Hirakawa T., Yamashita T., Tamaki T., Fujiyoshi H., Umezumi Y., Takeuchi I., Matsumoto S., and Yoda K. (2018) Can AI predict animal movements? Filling gaps in animal trajectories using Inverse Reinforcement Learning, Ecosphere, 9(10):e02447, 査読有
*Matsui K., *Tamaki T., Raytchev B., Kaneda K. (2017) Trajectory-set feature for action recognition. IEICE Transactions on Information and Systems, E100.D(8):1922-1924. 査読有
学会発表

研究項目 B01

【計画班 依田憲】

雑誌論文

*Yoda K., Okumura M., Suzuki H., Matsumoto S., Koyama S., Yamamoto M. (2021) Annual variations in the migration routes and survival of pelagic seabirds over mountain ranges. Ecology, e03297. 査読有
*水谷友一, 鈴木宏和, 前川卓也, Joseph Korpela, 宮竹貴久, 越山洋三, 依田憲 (2021) 海上飛翔中のウミネコによる昆虫捕食とその同定. 日本鳥学会誌 70, 53-60. 査読有
*Yoda K. (2019) Advances in bio-logging techniques and their application to study navigation in wild seabirds. Advanced Robotics 33, 108-117. 査読有
*Yamamoto T., Yoda K., Blanco G.S., Quintana F. (2019) Female-biased stranding in Magellanic penguins. Current Biology

*Ogawa D., Tamaki T., Hirakawa T., Raytchev B., Kaneda K. and Yoda K. (2019) Improved Activity Forecasting for Generating Trajectories, in Proc. of The International Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2019) 査読有

【公募班第1・2期 柳井啓司】

雑誌論文

Shimoda W. & Yanai K. (2019) Weakly Supervised Semantic Segmentation Using Distinct Class Specific Saliency Maps, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 191, No.2, pp.1-17 査読有

学会発表

Araki T., Hamada R., Ohno K. & Yanai K. (2019) Dog-Centric Activity Recognition by Integrating Appearance, Motion and Sound, Proc. of ICCV Workshop on Egocentric Perception, Interaction and Computing (EPIC) 査読有
【公募班第1・2期 波部齊】

雑誌論文

*Habe H., Yoshiki Takeuchi Y., Terayama K., Sakagami M. (2021). Pose estimation of swimming fish using an NACA airfoil model for collective behavior analysis. Journal of Robotics and Mechatronics 33(3). 査読有
*Abe K., Kuroda S., Habe H. (2020). A Multiple Video Camera System for 3D Tracking of Farmed Fry in an Aquaculture Tank. Sensors and Materials 32(11). 査読有

【公募班第1・2期 大西正輝】

学会発表

*Gao R., Zha A., Shigenaka S., Onishi M. (2021) Hybrid Modeling and Predictive Control of Large-Scale Crowd Movement in Road Network, Proceeding of HSCC 2021: 24th ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. 査読有
*Okukubo T., Bando Y., Onishi M., Ando H. (2021) Foot Traffic Prediction for Large-Scale Events Based on Pattern-Aware Neural Regression, AAAI-21 Workshop on AI for Urban Mobility. 査読有

【公募班第1期 村尾和哉】

学会発表

*宮前貴大, 双見京介, 村尾和哉 (2019) 視線と頭部動作情報を用いた歩行中の迷子状態検出手法. 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2019)論文集. 査読無
*宮前貴大, 双見京介, 村尾和哉 (2018) 視線情報を用いた歩行中の迷子状態の検出手法の検討. ユビキタスウェアラブルワークショップ 2018 論文集. 査読無

【公募班第2期 藤井慶輔】

*Fujii K., Takeishi N., Hojo M., Inaba Y., Kawahara Y. (2020) Physically-interpretable classification of network dynamics for complex collective motions, Scientific Reports, 10, 3005, 査読有
*Fujii K., Kawahara Y. (2019) Dynamic mode decomposition in vector-valued reproducing kernel Hilbert spaces for extracting dynamical structure among observables, Neural Networks, 117, 94-103, 査読有

29, R12-13. 査読有

*Ardakani A., Hashimoto K., Yoda K. (2019) Context-based semantical vector representations for animal trajectories. Advanced Robotics 33, 118-133. 査読有

*Shiomi K., Kokubun N., Shimabukuro U., Takahashi A. (2019) Homing ability of Adélie penguins investigated with displacement experiments and bio-logging. Ardea, 107, 333-339. 査読有

*Goto Y., Yoda K., Sato K. (2017) Asymmetry hidden in birds' tracks reveals wind, heading, and orientation ability over the ocean. Science Advances 3, e1700097. 査読有

*Yoda K., Yamamoto T., Suzuki H., Matsumoto S., Müller M., Yamamoto M. (2017) Compass orientation drives naïve pelagic seabirds to cross mountain ranges. Current Biology 27, R1152-1153. 査読有

【計画班 飛龍志津子】

雑誌論文

*Fujioka, E., Fukushima, M., Ushio, K., Kohyama, K., Habe, H. and Hiryu, S. (2021). Three-dimensional trajectory construction and observation of group behavior of wild bats during cave emergence. *Journal of Robotics and Mechatronics* 33, 556-563. 査読有

*Yamada, Y., Mibe, Y., Yamamoto, Y., Ito, K., Heim, O., and Hiryu, S. (2020). Modulation of acoustic navigation behaviour by spatial learning in the echolocating bat *Rhinolophus ferrumequinum nippon*. *Scientific reports* 10, 1-15. 査読有

Simmons, J. A., Hiryu, S., and Shriram, U. (2019). Biosonar interpulse intervals and pulse-echo ambiguity in four species of echolocating bats. *Journal of Experimental Biology*, jeb. 195446. 査読有

Maitani, Y., Hase, K., Kobayasi, K. I., and Hiryu, S. (2018). Adaptive frequency shifts of echolocation sounds in *Miniopterus fuliginosus* according to the frequency-modulated pattern of jamming sounds. *Journal of Experimental Biology* 221, jeb188565. 査読有

*Hase, K., Kadoya, Y., Maitani, Y., Miyamoto, T., Kobayasi, K., Hiryu, S. (2018) Bats enhance their call identities to solve the cocktail party problem. *Communications Biology* 1:39. 査読有

【公募班第1期 小池伸介】

雑誌論文

*Tochigi, K., Masaki, T., Nakajima, A., Yamazaki, K., Inagaki, A., Koike, S. (2018) Detection of arboreal feeding signs by Asiatic black bears: effects of hard mast production at individual tree and regional scales. *Journal of Zoology*, 305(4):223-231. 査読有

【公募班第1期 木下充代】

学会発表

木下充代:アサギマダラ複眼の領域性と飛翔行動との関係 アサギマダラの会まどめの会 大阪市自然史博物館 2019年3月16日, 大阪市 基調講演

雑誌論文

*木下充代. (2018) “チョウの長距離移動—渡りの方向を決める仕組み”. *生物の科学 遺伝*, Vol. 72, pp. 177-182. 査読無

Nagloo, N., Kinoshita, M., *Arikawa, K. (2020) Spectral organization of the compound eye of a migrating butterfly *Parantica sita*. *Journal of Experimental Biology*. 223, jeb.217703 査読有

【公募班第1・2期 佐倉緑】

雑誌論文

*Ai, H., Okada, R., Sakura, M., Wachtler, T., Ikeno, H. (2019) Neuroethology of the waggle dance: how followers interact with the waggle dancer and detect spatial information. *Insects* 10, 336. 査読有

Kobayashi, N., Okada, R., *Sakura, M. (2020) Orientation to polarized light in tethered flying honeybees. *Journal of Experimental Biology* 223, jeb228254. 査読有

【公募班第1期 宮竹貴久】

雑誌論文

Matsumura, K., *Miyatake, T. (2018) Responses to relaxed and reverse selection in strains artificially selected for duration of death-feigning behavior in the red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *Journal of Ethology* 36:pages161-168. 査読有

【公募班第1期 永澤美保】

雑誌論文

*Konno, A., Inoue-Murayama, M., Yabuta, S., Tonoike, A., Nagasawa, M., Mogi, K., Kikusui, T. (2018) Effect of canine oxytocin receptor gene polymorphism on the successful training of drug detection dogs. *Journal of Heredity*, 109(5):566-572. 査読有

【公募班第1期 高橋晃周】

雑誌論文

*Ito, K., Watanabe, Y., Kokubun, N., Takahashi, A. (2021) Inter-colony foraging area segregation quantified in small colonies of Adélie Penguins. *Ibis* 163, 90-98. 査読有

*Thiebot, J.-B. Arnould, P.Y. J, Gómez-Laich, A., Ito, K., Kato, A., Mattern, T., Mitamura, H., Noda, T., Poupart, T., Quintana, F.,

Raclot, Y., Ropert-Coudert, Y., Sala, E. S., Seddon, J. P., Sutton, J. G., Yoda, K., Takahashi, A. (2017) Jellyfish and other gelata as food to four penguin species - insights from predator-borne videos. *Frontiers in Ecology and the Environment* 15, 437-441. 査読有

【公募班第2期 北川貴士】

雑誌論文

*Tian, Y., Maekawa, T., Hara, T., Yokomori, Y., Kitagawa, T. (2021) NaviMine: A tool for mining trajectories through behavior prediction. 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops). eCF Paper Id: 1570694231 査読有

【公募班第2期 志垣俊介】

学術雑誌

*Hernandez-Reyes, C. A., Fukushima, S., Shigaki, S., Kurabayashi, D., Sakurai, T., Kanzaki, R., & Sezutsu, H. (2021). Identification of exploration and exploitation balance in the silkworm olfactory search behavior by information-theoretic modeling. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 15: 629380. 査読有

*Shigaki, S., Haigo, S., Reyes, C. H., Sakurai, T., Kanzaki, R., Kurabayashi, D., & Sezutsu, H. (2019). Analysis of the role of wind information for efficient chemical plume tracing based on optogenetic silkworm moth behavior. *Bioinspiration & Biomimetics*, 14(4), 046006. 査読有

*Shigaki, S., Haigo, S., Reyes, C. H., Sakurai, T., Kanzaki, R., Kurabayashi, D., & Sezutsu, H. (2019). Analysis of the role of wind information for efficient chemical plume tracing based on optogenetic silkworm moth behavior. *Bioinspiration & Biomimetics*, 14(4), 046006. 査読有

【公募班第2期 新津葵一】

雑誌論文

Kobayashi, A., Hayashi, K., Arata, S., Murakami, S., Xu, G. and *Niitsu, K. "Design of a Self-Controlled Dual-Oscillator-Based Supply Voltage Monitor for Biofuel-Cell-Combined Biosensing Systems in 65-nm CMOS and 55-nm DDC CMOS", *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS)*, vol.13, Dec. 2019. 査読有

Hayashi, K., Arata, S., Xu, G., Murakami, S., C.D. Bui, Kobayashi, A., *Niitsu, K. "A 385 × 385 μm² 0.165V 0.27nW Fully-Integrated Supply-Modulated OOK Transmitter in 65nm CMOS for Glasses-Free, Self-Powered, and Fuel-Cell-Embedded Continuous Glucose Monitoring Contact Lens", *IEICE Trans. Elec.*, vol. E102, Jul. 2019. 査読有

【公募班第2期 河端雄毅】

雑誌論文

*Kawabata, Y., Akada, H., Shimatani, K., Nishihara, G.N., Kimura, H., Nishiumi, N., Domenici, P. (2020) Geometrical model explains multiple preferred escape trajectories of fish. *bioRxiv*, 2020.2004.2027.049833. 査読無

*山中遼, 米山和良, 河端雄毅. (2020) 携帯型ステレオカメラを用いた魚類の逃避行動計測の精度検証. *長崎大学水産学部研究報告*, 100, 1-5. 査読有

【公募班第2期 伊藤健彦】

雑誌論文

*Imai, S., Ito, T. Y., Shinoda, M., Tsunekawa, A., Lhagvasuren, B. (2020) The benefit and strategy of spring movements in Mongolian gazelles. *Journal of Mammalogy* 101, 487-497. 査読有

*Nandintsetseg, D., Bracis, C., Leimgruber, P., Kaczynsky, P., Buuveibaatar, B., Lkhagvasuren, B., Chimeddorj, B., Enkhtuvshin, S., Horning, N., Ito, T. Y., Olson, K., Payne, J., Walzer, C., Shinoda, M., Stabach, J., Songer, M., Mueller, T. (2019) Variability in nomadism: Environmental gradients modulate the movement behaviors of dryland ungulates. *Ecosphere* 10, e02924. 査読有

【公募班第2期 西海望】

学会発表

Nishiumi, N. (2020) Tactics research in predators and prey by quantitative and kinematic measurement. The 43th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society. 査読無

Nishiumi, N., Fujioka, E., Hiryu, S. (2019) Tactics used by bats when pursuing prey: predictive control of echolocation sonar direction and flight course. A joint meeting of the 56th Annual Conference of the Animal Behavior Society and the 36th International Ethological Conference. 査読無

研究項目 B02

【計画班 高橋晋】

雑誌論文

*[Takahashi, S.](#), Hombe, T., Takahashi, R., Ide, K., Okamoto, S., [Yoda, K.](#), [Kitagawa, T.](#), *[Makiguchi, Y.](#) (2021) “Wireless logging of extracellular neuronal activity in the telencephalon of free-swimming salmonids”, *Animal Biotelemetry*, 9:9. 査読有
Hoshino, S., Takahashi, R., Mieno, K., Tamatsu, Y., Azechi, H., Ide, K., *[Takahashi, S.](#) (2020) “The Reconfigurable Maze Provides Flexible, Scalable, Reproducible, and Repeatable Tests”, *iScience*, 23(1):100787. 査読有

学会発表

*[Takahashi, S.](#), Hoshino, S., Ide, K., (2019) “The Next Phase for Tracking and Predicting the Navigational Behavior Using Machine Learning”, *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*. 査読有

知的財産権

「小動物実験用迷路組立キット」、発明者: [高橋晋](#)、出願人: 学校法人同志社大学(特願 2017-252076) 登録日: 平成 29 年 12 月 27 日, 出願中, 外国出願無

【計画班 小川宏人】

雑誌論文

[Ando, N.](#), Shidara, H., Hommaru, N., *[Ogawa, H.](#) (2021) Auditory virtual reality for insect phonotaxis. *Journal of Robotics and Mechatronics* 33,494-504. 査読有

Hommaru, N., Shidara, H. [Ando, N.](#), *[Ogawa, H.](#) (2020) Internal state transition to switch behavioral strategies in cricket phonotaxis behavior. *Journal of Experimental Biology* 223, jeb229732. 査読有

Sato, N., Shidara, H., *[Ogawa, H.](#) (2019) Trade-off between motor performance and behavioural flexibility in the action selection of cricket escape behaviour. *Scientific Reports* 9,18112. 査読有

Someya, M., *[Ogawa, H.](#) (2018) Multisensory enhancement of burst activity in an insect auditory neuron. *Journal of Neurophysiology* 120,139-148. 査読有

Fukutomi, M., *[Ogawa, H.](#) (2017) Crickets alter wind-elicited escape strategies depending on acoustic context. *Scientific Reports* 7, 15158. 査読有

【計画班 木村幸太郎】

雑誌論文

*[Wen, C.](#), Miura, T., Voleti, V., Yamaguchi, K., Tsutsumi, M., Yamamoto, K., Otomo, K., Fujie, Y., Teramoto, T., Ishihara, T., Aoki, K., Nemoto, T., Hillman, E.M.C., *[Kimura, K.D.](#) (2021) 3DCellTracker, a deep learning-based pipeline for segmenting and tracking cells in 3D time lapse images. *eLife* 10: e59187. 査読有

Voleti, V., Patel, K.B., Li, W., Perez, Campos C., Bharadwaj, S., Yu, H., Ford, C., Casper, M.J., Yan, R.W., Liang, W., Wen, C., [Kimura, K.D.](#), Targoff, K.L., *[Hillman, E.M.C.](#) (2019) Real-time volumetric microscopy of in vivo dynamics and large-scale samples with SCAPE 2.0. *Nature Methods* 16: 1054-1062. 査読有
Yamazaki, S. J., Ohara, K., Ito, K., Kokubun, N., [Kitanishi, T.](#), Takaichi, D., Yamada, Y., Ikejiri, Y., Hiramatsu, F., Fujita, K., Tanimoto, Y., Yamazoe-Umemoto, A., [Hashimoto, K.](#), [Sato, K.](#), [Yoda, K.](#), [Takahashi, A.](#), Ishikawa, Y., [Kamikouchi, A.](#), [Hiryu, S.](#), [Maekawa, T.](#), *[Kimura, K.D.](#) (2019) STEFTR: A Hybrid Versatile Method for State Estimation and Feature Extraction From the Trajectory of Animal Behavior. *Frontiers in Neuroscience* 13: 970. 査読有

Hara-Kuge, S., Nishihara, T., Matsuda, T., Kitazono, T., Teramoto, T., Nagai, T., *[Ishihara, T.](#) (2018) An improved inverse-type Ca²⁺ indicator can detect putative neuronal inhibition in *Caenorhabditis elegans* by increasing signal intensity upon Ca²⁺ decrease. *PLoS One*. 13:e0194707. 査読有

Tanimoto, Y., Tanimoto, Y., Yamazoe-Umemoto, A., Fujita, K., Kawazoe, Y., Miyaniishi, Y., Yamazaki, J. S., Fei, X., Busch, E., K., Gengyo-Ando, K., [Nakai, J.](#), Iino, Y., Iwasaki, Y., [Hashimoto,](#)

[K.](#), *[Kimura, K.D.](#) (2017) Calcium dynamics regulating the timing of decision-making in *C. elegans*. *eLife* 6: 13819. 査読有

【公募班第1・2期 豊島有】

雑誌論文

*[Oda, S.](#), [Toyoshima, Y.](#), *[Bono, de M.](#) (2017) Modulation of sensory information processing by a neuroglobin in *C. elegans*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114, E4658-E4665. 査読有

[Toyoshima, Y.](#), Wu S., Kanamori M., Sato H., Jang M.S., Oe S., Murakami Y., Teramoto T., Park C., Iwasaki Y., [Ishihara T.](#), *[Yoshida R.](#), *[Iino Y.](#) (2020) Neuron ID dataset facilitates neuronal annotation for whole-brain activity imaging of *C. elegans*. *BMC biology* 18, 30. 査読有

【公募班第1・2期 北西卓磨】

雑誌論文

Umaba, R., *[Kitanishi, T.](#), *[Mizuseki, K.](#) (in press) Monosynaptic connection from the subiculum to medial mammillary nucleus neurons projecting to the anterior thalamus and Gudden’s ventral tegmental nucleus. *Neuroscience Research*. 査読有

*[Kitanishi, T.](#), Umaba, R., *[Mizuseki, K.](#) (2021) Robust information routing by dorsal subiculum neurons. *Science Advances*, 7:eabf1913. 査読有

【公募班第1期 武藤彩】

雑誌論文

*[Muto, A.](#), Kawakami, K. (2018) Ablation of a neuronal population using a two-photon laser and its assessment using calcium imaging and behavioral recording in zebrafish larvae. *Journal of Visualized Experiments*, 136: e57485. 査読有

【公募班第1・2期 佐藤正晃】

雑誌論文

*[Sato, M.](#), Mizuta, K., Islam, T., Kawano, M., Sekine, Y., Takekawa, T., Gomez-Dominguez, D., Schmidt, A., Wolf, F., Kim, K., Yamakawa, H., Ohkura, M., Lee, M. G., Fukai, T., [Nakai, J.](#), *[Hayashi, Y.](#) (2020) Distinct mechanisms of over-representation of landmarks and rewards in the hippocampus. *Cell Reports* 32(1), 107864. 査読有

*[Sato, M.](#), Kawano, M., Mizuta, K., Islam, T., Lee, M. G., Hayashi, Y. (2017) Hippocampus-dependent goal localization by head-fixed mice in virtual reality. *eNeuro*, 4 (3) e0369-16.2017. 査読有

【公募班第1期 McHugh Thomas】

雑誌論文

Middleton, S. J., Kneller, E. M., Chen, S., Ogiwara, I., Montal, M., Yamakawa, K., *[McHugh, T.J.](#) (2018) Altered hippocampal replay is associated with memory impairment in mice heterozygous for the SCN2A gene. *Nature Neuroscience*, 21:996-1003. 査読有

【公募班第1期 東島眞一】

【公募班第2期 上川内あづさ】

雑誌論文

Kim, H., Horigome, M., Ishikawa, Y., Li, E., Lauritzen, J.S., Card, G., Bock, D.D., *[Kamikouchi, A.](#) (2020) Wiring patterns from auditory sensory neurons to the escape and song-relay pathways in fruit flies. *The Journal of Comparative Neurology*. 24877: 1-31. 査読有

*[Ishimoto, H.](#), *[Kamikouchi, A.](#) (2020) A feedforward circuit regulates action selection of pre-mating courtship behavior in female *Drosophila*. *Current Biology* 30: 396-407. 査読有

【公募班第2期 岩橋好昭】

*[Tsujioka, M.](#), Uyeda, T.Q.P., [Iwadate, Y.](#), Patel, H., Shibata, K., Yumoto, T. and Yonemura, S. (2019). Actin-binding domains mediate the distinct distribution of two *Dictyostelium* Talins through different affinities to specific subsets of actin filaments during directed cell migration. *PloS one* 14: e0214736. 査読有

<ホームページ・記事報道等>

- ・生物移動情報学 <http://navi-science.jp>
- ・ニューズレター新学術領域「生物ナビゲーションのシステム科学」[ニューズレターVol.1~Vol.5](#)
- ・国際コンペ Animal Behavior Challenge ([ABC2018](#)), Human Behavior Challenge ([HBC2018](#)), Mouse Behavior Challenge ([MBC2020](#)), Basketball Behavior Challenge ([BBC2020](#))
- ・[Youtube チャンネル AI on Animals —野生動物に搭載した人工知能が見た世界—](#)
- ・日本経済新聞 動物たちは見た AIカメラ一瞬を切り取る 2021/2/14.
- ・子供の科学 知られざる野生動物の行動が明らかに！ 2021/2.
- ・読売新聞 海鳥の餌捕獲-AIとらえた 2020/11/29.
- ・日本経済新聞 生物にAIカメラ装着 大阪大など行動を撮影 2020/11/22.
- ・NHK 総合 野生動物の生態 AI装置で撮影 2020/11/16.
- ・Aihub AI-assisted camera system to monitor seabird behaviour 2020/11/13.
- ・CBC 放送チャント！ 密着カメラで動物の生態が！ 2020/11/11.
- ・ニュースイッチ 動物の特定?動だけAI撮影、伝染病を媒介する?間との関わり解明へ 2020/11/9.
- ・日刊工業新聞 動物特定行動だけ撮影 観察向け記録デバイス開発 2020/11/6.
- ・NEW ATLAS AI-enabled critter camera only records targeted behaviors 2020/11/5.
- ・中日新聞 AIで野生動物調査が効率的に 名大など新装置開発、海鳥撮影に成功 2020/11/4.
- ・The Register Japanese eggheads strap AI-powered backpacks to seagulls 2020/11/3.
- ・UNITE.AI AI Helps Observe Previously Unreported Animal Behaviors 2020/11/2.
- ・中日新聞 AIでトリ逃さない 野生動物調査 効率的に 2020/11/2.
- ・日刊工業新聞 動物の行動をAI分析 阪大など開発、病気・共生研究促す 2020/10/21.
- ・[Nature 関連誌注目のハイライト:【動物学】群れの中のコウモリは反響定位信号を変えてカクテルパーティー問題を図る.](#) 2018/5/3
- ・読売新聞 海鳥の幼鳥 危険な内陸飛行 2018/2/9
- ・読売新聞 海鳥目線 AIで撮影 2017/9/29
- ・読売新聞 生物の「空の羅針盤」探る 2017/9/22
- ・読売新聞 「線虫」周囲分析し意思決定 2017/6/30
他多数

<主催シンポジウム等>

- ・第43回日本神経科学大会 公募シンポジウム「センシングとAIが結ぶ神経科学と生態学」(オンライン開催) 2020/7/29-8/1
- ・新学術「個性創発脳」領域会議、公開シンポジウム、「トラジェクトリマイニングとその課題」(参加者:100名) (計画班 A01 橋本) 2019/8/1
- ・Neuro2019(第42回日本神経科学大会 第62回日本神経化学会大会)公募シンポジウム「データ駆動型/モデル駆動型神経科学研究の幕開け」(参加者:100名) 2019/7/26
- ・ACML2019 workshop on Machine Learning for Trajectory, Activity, and Behavior (TAB2020) (参加者:50名) 2019/11
- ・第66回日本生態学会大会シンポジウム「生物移動に対する新たな挑戦(生物移動情報学)」(参加者:60名) 2019/3
- ・International Workshop on Behavior analysis and Recognition for knowledge Discovery (BiRD 2019) (参加者:30名) 2019/3
- ・Tokyo Workshop on Sequence and Trajectory Data Analysis 2018 (参加者50名) 2018/9
- ・第36回日本ロボット学会学術講演会オーガナイズドセッション

- 生物移動情報学(参加者:25名) 2019/9
- ・Symposium on Systems Science of Bio-Navigation 2018(参加者:100名) 2018/9
- ・日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 オーガナイズドセッション生物移動情報学(発表11件) 2018/6
- ・第62回システム制御情報学会研究発表講演会 オーガナイズドセッション「生物移動情報学」(参加者:30名) 2018/5
- ・システムインテグレーション部門講演会 2017 オーガナイズドセッション「生物移動情報学」(参加者:52名) 2017/12
- ・ICMA2017 Tutorial Workshops on Systems Science of Bio-navigation(参加者:35名) 2017/8
- ・ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2017 オーガナイズドセッション「生物移動情報学」(参加者:40名) 2017/5
- ・第12回バイオリギングシンポジウム「バイオリギング×情報科学」(参加者:101名) 2016/12
- ・RSJ2016 オープンフォーラム「生物ナビゲーションのシステム科学」(参加者:30名) 2016/9

<一般向けアウトリーチ活動等>

- ・冊子「生物のナビゲーションに学ぶ」自費出版(総括班)2021
- ・名市大市民公開講座 人工知能技術とロボット技術を使った動物の「行動」の理解 (計画班 B02 木村) 2020/11/21
- ・「生物の科学 遺伝」, 株式会社エヌ・ティー・エス, 特集号「生物のナビゲーションを科学する—なぜたどりつけるのか:生物のナビゲーションに秘められた謎に迫る」, Vol.71, No.6, 2017年11月号
- ・「生物の科学 遺伝」, 株式会社エヌ・ティー・エス, 連載「生物のナビゲーションに学ぶ」, 第1回(2018年1月号)~第16回(2020年11月号)
- ・「ロボット学会誌」, 日本ロボット学会, 連載解説記事, 第1回(2016年8月)~第9回(2017年8月)
- ・PyCon mini Hiroshima 2018, Python で動物の行動データを解析する研究をするには(計画班 A02 玉木) 2018/10/6
- ・九十九島水族館「九十九島の日 研究発表会」(公募班 A02 波部) 2018/9/17
- ・初めてのロボットプログラミング体験 ~ペンギンロボットを作ろう!~ (計画班 A02 竹内)2018/7/21
- ・電子情報通信学会北海道支部講演会 ヒト・動物行動の理解にむけた実世界センサデータマイニング技術 主催:電子情報通信学会北海道支部(計画班 A02 前川) 2018/3/2
- ・OWA 講演会 マッコウクジラの謎に迫るロボットテクノロジー 主催:小笠原ホエールウォッチング協会(計画班 A01 妻木・森) 2017/9/12
- ・ひらめきときめきサイエンス コウモリの超音波を計測してみよう! —生物に学ぶ音の物理— 主催:JSPS (計画班 B01 飛龍) 2017/7/29
- ・生物に学ぶ研究領域 講演会 主催:豊田研究所(計画班 A02 竹内、B01 飛龍) 2017/7/11
- ・The 6th International Seminar on Biodiversity and Evolution, Wildlife Science by New Biologging studies 主催:京都大学野生動物研究センター (計画班 A02 前川、B01 依田、飛龍) 2017/5/30
- ・科学の甲子園特別シンポジウム 主催:JST/E テレ (計画班 B01 飛龍)2017/3/19
- ・公開シンポジウム「情報科学」から「行動の因果」を考える, 生物行動のシステム科学, 主催:東北大学情報科学研究科(計画班 A01 橋本)2017/2/18
- ・名古屋大学出前授業 ハイテク動物行動学:バイオリギング 主催:豊橋自然史博物館 (計画班 B01 依田) 2016/12/11
他11件

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

(1) 領域内の研究項目間の連携

体制

本領域では、制御工学(A01)、データ科学(A02)、生態学(B01)、神経科学(B02)の4つのチームを組織し、チーム内に個別の研究項目を設定した。また公募班についても、同様にこの4つのチームのいずれかに所属するように配置した。しかし、この研究戦略を実現するためには、公募班も含めた全ての研究項目間での連携が必須である。そこで、図17に示すような研究項目間で計測装置の開発や解析手法

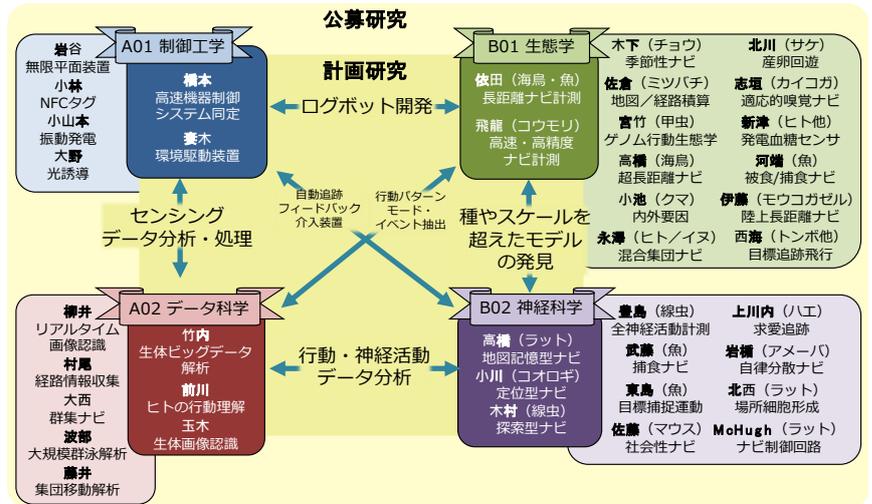


図17: 本領域の連携体制

の提供、研究データの共有や共同分析などを行った。具体的な技術支援としてログロボット（高性能ロギングデバイス）の提供とデータ駆動型分析プラットフォームの構築が上げられる。これにより、1つの研究対象に対して複数の班が全く異なる側面からアプローチできる、これまでにないレベルでの多角的共同研究が展開できた。

(2) 計画研究及び公募研究間の連携体制

一般的に新学術領域研究では、公募班は計画班や他の公募班との連携がとりにくく、共同研究も発展しにくい。そこで本領域ではこの問題解決に組織的に取り組むために、研究計画班や総括班を中心として、図18に示すような領域支援体制を組織した。具体的な取組として、領域会議のほか、「(1)生物系研究者に対する組織的な技術支援」と「(2)融合的な研究者育成支援(異分野弟子入り、若手合宿、基礎知識講習会など)」に重点をおいた下記のような活動を行った。

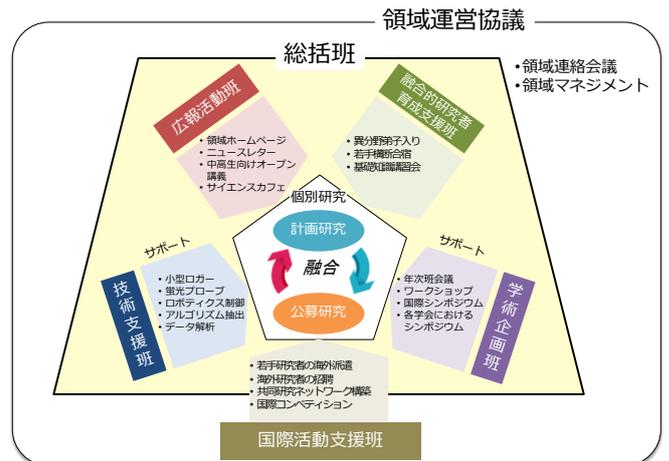


図18: 本領域の支援体制

- ① 異分野弟子入りのための費用支援：若手研究者が異分野の共同研究先に滞在し、技術や知識を学ぶ。1回の期間は1週間～3ヶ月程度。
- ② 若手合宿：1泊2日で合宿形式の研究会を行い、若手による研究発表会とグループワーク、シニアによるセミナー、解析手法等に関するワークショップと相談会。年に1回のペースで実施。
- ③ 基礎知識講習会（勉強会、相談会を含む）：若手合宿とは別に、研究代表者を主な対象とした領域内の講習会。様々なテーマで年数回のペースで実施。
(最終年度は新型コロナウイルスのため、若手合宿は中止、領域会議や講習会はオンラインで実施した。)

(3) 研究組織間の連携による成果

(1)、(2)で記載した連携推進活動の結果として、年度あたり平均 95 件の領域内外の共同研究が行われ、その多くは領域研究期間終了後の現在も継続中である。これらの共同研究による研究成果として、特に異分野融合により得られた成果に係る雑誌論文(国際誌・査読有)数は 317 件である。その代表的な研究成果である前川らの論文(Maekawa et al., Nat Commun 2020)は、学術的な評価はもちろん、社会的なインパクトも高く、多くのメディアでも取り上げられた。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

【概要】

研究経費は主に、研究領域全体を通じた活発な融合研究を促進するためのナビゲーション計測装置と解析プラットフォームを開発し、それらを共用設備として運用する経費として支出された。具体的には、高機能・高汎用性の小型行動記録装置「ログボット」や、機械学習による解析ソフト(DeepHL など)を確立するための博士研究員の雇用費や専用計算機サーバの購入費として支出された。また、野外及び実験室での各種動物の行動データ取得や数理モデルの作成などのために、生物個体に装着するロガーや計測装置などを設備費や消耗品費として支出し、これを基軸として制御工学、データ科学、生態学、神経科学に跨る融合領域の形成に成功した。例えば、ログボット(Korpela et al., Comm Biol 2020)は、制御工学、データ科学、生態学の共同研究成果であり、DeepHL(Maekawa et al., Nat Comm 2020)は、データ科学、生態学、神経科学の共同研究成果である。このように、ログボットや DeepHL をはじめとした各種ツール群は、総括班が配布し、領域内の計画研究、公募研究を跨ぐ融合研究を促進させる強力なツールとして機能した。各計画研究や公募研究では、初年度にナビゲーション移動行動を計測するための大型計測装置や、動物に装着するロガーを製作するための装置などが支出されており、研究期間全体を通して効果的な活用に努め、研究業績欄に示すように多数の論文報告をすることができた。

具体的な各班の研究費使用状況については、以下のようになる。

【総括班】

総括班の研究費は、多種ログボットの開発を主導し、それを総勢約 100 名の領域メンバーで効果的に活用するための講習会を主催するために支出された。ログボットは、計画班や公募班に配布し、現場からのフィードバックを元にバージョンアップを繰り返したため、その開発費と製作費が主に支出された。ログボットや AI による解析ソフト等、様々な計測・解析プラットフォームを整備することにより、生物ナビゲーションについて数多くの知見を得ることができ、ログボット(Korpela et al. Comm Biol 2020)や、移動解析プラットフォーム群(DeepHL: Maekawa et al., Nat Comm 2020)を世界に先駆けて開発し、多数の国内(NHK 他 7 件)・海外メディア(Nature Ecology community 他 31 件)に取り上げられ、「生物移動情報学」領域として確固たる地位を築いた(「10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況」参照)。

また、異分野融合を実質的に進めるために、共同研究先に最大3ヶ月程度滞在する費用を支出することで「異分野弟子入り」を支援し、異分野融合研究の大きな礎となった(「11 若手研究者の育成に関する取組実績」参照)。

加えて、領域主催の国際会議、ログボット操作法やデータ処理法に関する技術講習会や、年1回の領域会議を開催し、ナビゲーション研究と領域内共同研究の促進に有効に活用された。それらの成果を多数の論文や国際会議で発表したほか、書籍を含む多くのアウトリーチ活動の実施にも活用された。

【国際活動支援】

国際活動支援班の主な費用は、ナビゲーション分析手法の国際的コンペティション、若手研究者の海外渡航、研究者招聘を実施するために支出され、本領域の国際的な研究活動を促進した。

具体的には、本領域において、ログボットや小型多次元データロガーから収集したナビゲーションデータ等を題材とした国際的コンペティションを、CodaLab において4回開催した(Animal Behavior Challenge 2018, Human Behavior Challenge 2018, Mouse Behavior Challenge 2020, Basketball Behavior Challenge 2020)。それらの優勝者を本領域主催の国際シンポジウムや領域会議に招聘し、その交流を契機として新たな国際的連携研究ネットワークを構築した。また、ICMA (IEEE International Conference on Mechatronics and Automation)や PerComp などの国際会議において、海外研究者と共に本領域の研究内容を議論する国際チュートリアルワークショップを開催し、国際活動を促進した。

各計画研究において、これまでに培ってきた国際的共同研究を有機的に連携させる取り組みも実施し、本領域に所属する助教、博士研究員、大学院生といった若手研究者が、国際共同研究を実施することを積極的に奨励するため、海外渡航費を支援した。若手研究者を北米、英国、カナダ、ベルギー、アルゼンチン等へ派遣し、ドイツなどから若手研究者を招聘し、1週間から約3ヶ月と中長期にわたる交流を16件実施した。その中では共同実験も実施した。これらの相互派遣の成果は、国際共同研究論文に発展した。

また、2018年度には国際シンポジウムを開催し、ヒトのナビゲーション移動行動の研究を推進する北米 Microsoft Research 主席研究者である John Krumm 博士、海鳥や魚のナビゲーション研究において世界的な権威と知られる英国 Swansea University の Rory P. Wilson 教授、昆虫のナビゲーションナビゲーション研究を国際的に牽引する若手研究者である米国ハワードヒューズ財団ジェネリア研究所の Dan Turner-Evans 博士といった、ナビゲーション研究を牽引する国際的に評価の高い海外研究者を招聘し、本領域の国際的位置づけを強化した。

計画研究と公募研究に関する研究費使用状況については、学問領域毎にその活用状況を説明する。

【A01 制御工学班】

制御工学班の研究費は、ログボットをはじめとする様々な計測装置を開発するための開発費が重点的に投じられた。それらの計測装置は、試行錯誤しながら改良を繰り返したため、開発費は研究期間全体を通し支出された。その成果は、ログボット (Korpela et al., Comm Biol 2020) を世界に先駆けて開発したように、多数の国内 (NHK 他 7 件)・海外メディア (Nature Ecology community 他 31 件) に取り上げられた。また、計画研究、公募研究の個別研究においては、遊泳中のクジラに装着するロガーや、ナビゲーション計測用の無限平面装置などの計測装置を開発するための開発費に加えて、その性能を評価するための現地調査費用が支出された。

【A02 データ科学班】

A02 データ科学班の研究費は、AI による解析ソフト等、様々な計測・解析プラットフォームを整備するため、その開発を担当する博士研究員、計算機サーバなどに主に投じられた。また、それら解析プラットフォームなどを研究領域全体で普及させ、研究領域を活性化させるための普及活動として旅費が支出された。その成果である移動解析プラットフォーム群が、データ科学、生態学、神経科学班に跨る融合研究論文 (DeepHL: Maekawa et al., Nat Comm 2020, Hirakawa, et al., Ecosphere, 2018 など) として報告されたように、計画研究や公募研究での学際的な融合研究を促進し、生物ナビゲーションについて数多くの知見を得ることができた。

【B01 生態学班】

生態学班の研究費は、野生動物の移動を記録するため、国内外に点在するフィールドに長期間出張する旅費に主に投じられた。また、移動計測用のロガーを大量に購入している。これらは、野生動物に搭載し全て回収できる訳ではないため、消耗品として計上された。アルゼンチンなどの海外拠点での共同研究を活発に実施したため、多くの海外旅費も計上され、国際的な共同研究に繋がった。その成果は、Current Biology など多数の国際学術論文として報告され、ナビゲーション理解を促進した。

【B02 神経科学班】

神経科学班の研究費は、屋内において、バーチャルリアリティ実験装置、高精度顕微鏡、再構成可能な迷路などを設置した検証実験や、遺伝子組換え実験などを実施したため、設備費、消耗品費が主に支出された。その成果は、Nature Neuroscience, Nature Communications, Science Advances, eLife, Journal of Neuroscience など多数の国際学術論文として報告されたようにナビゲーション機能理解を促進した。

【繰越、延長申請】

新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受けた国際活動支援班に加えて、4つの計画研究が延長あるいは繰越申請を行った。国際活動支援班では、延期された5件の海外派遣費用が延長された。派遣先とのコンタクトは継続しており、新型コロナウイルスの感染状況を注視しつつ、派遣計画を再構築している。また、各計画研究においても新型コロナウイルス感染症拡大の影響で延期されたフィールドワークや計画していた実験が中止されたなどの理由により、繰越申請が承認されている。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本新学術領域は、制御工学、情報学(データ科学)、生態学、神経科学が動物やヒトの移動行動に着目することで、「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」であり、新領域「移動情報学」を創成するに至った。また、関連する「制御工学」、「情報科学」、「生態学」、「神経科学」へもインパクトや波及効果を与えた。

【新興・融合領域「移動情報学」の創成によるインパクトや波及効果】これまで、動物、ヒト、モノの移動は、それぞれの対象物を研究する分野(例:鳥の移動なら鳥研究分野、魚の移動なら魚研究分野)で個別に研究されてきたが、本新学術領域により、異なる対象の移動行動を共通の基盤で計測、分析、理解、検証できることが明らかになり、「移動」に焦点をあてた新たな新興・融合領域を創成することができた。特に、移動行動の計測においては、ログボットと我々が名付けた AI 搭載型の小型計測装置を導入し、環境やスケールの異なる移動行動計測を統一的な枠組で行えることを実証した。また、移動行動データ分析においても、共通の分析基盤を確立し、環境やスケールの異なる移動行動計測を統一的な枠組で行えることを実証した。

【計測工学分野に与えたインパクトや波及効果】不確実な環境で移動する動物・ヒト・モノの移動行動を計測するには、計測装置の頑健性、軽量性、安価性、低消費電力性など、様々な制約条件が課される。本領域では、異なる技術を有する制御工学の専門家が、環境やスケールの異なる様々な計測課題に共通の基盤で取り組むことで、移動計測のための新たな技術開発・基盤整備が飛躍的に進展した。とりわけ、ログボットの開発においては、様々な移動対象に対して、計測、分析、理解、検証のループを繰り返すことにより、従来のロギングデバイスとは一線を画した次世代の移動計測装置を作成することができた。

【情報学分野に与えたインパクトや波及効果】計測装置の発達によって動物、ヒト、モノの移動データが蓄積されるようになり、データ駆動型の研究開発の試みが様々な分野で始まっている。5年前に開始した本新学術領域はそのさきがけであり、環境やスケールの異なる移動対象の移動データを統一的に扱うデータ分析基盤を構築してきた。本領域では、特に、科学研究のための移動データからの知識発見にとりくみ、条件の異なる複数のグループにおいて、グループ間で異なる移動行動を抽出する複数の技術を開発した。様々な動物、ヒト、モノの移動に対して適用可能な汎用性の高い分析方法、統計的信頼性が担保された分析方法などが開発され、情報学分野の関連領域からも大きく注目を集めた。

【生態学分野に与えたインパクトや波及効果】生態学においては、バイオリギングと呼ばれる野生動物にデータロガーを活用することの有用性の認識が年々高まっている。しかしながら、従来のバイオリギング研究では、個別の動物種の個別の移動行動に特有のものであることが多かった。本新学術領域において、計測工学、ならびに、情報学の研究者と生態学の研究者が長期間の共同研究体制を組んだことで、汎用的かつ革新的なバイオリギング技術が確立され、飛躍的な発展を遂げた。動物移動行動の数理モデル研究においても、従来の知識駆動型モデルに加え、データ駆動型モデルの活用も飛躍的に進展した。

【神経科学分野に与えたインパクトや波及効果】本領域により、神経科学研究で着目されてきたマイクロな視点に加え、生態学におけるマクロな視点を導入することで、新たな計測技術、分析技術の利用が神経科学研究の発展に有益であることが明らかになった。特に、近年は数百～万単位の神経細胞活動の大規模計測が可能になったにも関わらず、最終的な出力である行動の解析が非常に乏しいことが問題になっていた(Anderson and Perona, Neuron 2014; Gomez-Marín et al., Nat Neurosci 2014; Krakauer et al., Neuron 2017)。本領域の研究により「行動の意味」を人工知能技術でデータ駆動的に解釈できるようになったことにより、これまでに蓄積された大規模神経活動データから脳機能研究におけるデジタルトランスフォーメーションを起こすことが可能になった。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和3年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手研究者は、2016年度は56人の領域メンバーのうち17人、2017年度は102人中33人、2018年度は110人中36人、2019年度は107人中43人、2020年度は102人中40人であった。この他に多くの大学院生が本領域で研究活動を行った。以下に若手研究者育成に関する取組を示す。

（1）異分野弟子入り制度 49件：実質的な融合研究を促進するため、本領域では大学院生や博士研究員が共同研究先に滞在し、工学チームメンバーが生物の計測や飼育に携わること、また生物チームメンバーが装置自作や解析用プログラムの作成などを行った。この「弟子入り」では自らの専門とは異なる技術や視点を新たに習得し、また自らの専門も新たな分野で活かすことで、異分野融合型ナビゲーション研究を促進させることができた。

（2）若手横断合宿 4回：年1度の領域会議では、研究代表者が研究成果を発表することが前提であり、若手研究者同士が交流する機会は十分でない。そこで、年1回、研究代表者以外の若手が、「実験手法の交流」「ツールの共有」「シーズ・ニーズの周知」を、夜通し議論する機会を設けた。第1回は大阪大学（2016年11月25-26日、参加者33名）、第2回は北海道大学セミナーハウス（2017年9月9-10日、参加者56名）、第3回は蔵王アストリアホテル（2018年9月27-28日、参加者55名）、第4回はホテル竹島（2019年9月25日-26日、参加者63名）で開催され、若手参加者によるショートプレゼンテーションやポスター、異分野横断の若手チームで研究のシーズ・ニーズの議論、共同研究提案を発表するグループワーク、異分野間での問題共有を行うポスター発表、技術相談会などを実施した。年度を追うごとに本領域が目指す「融合的人材」が育っていることを実感できた。第5回は北海道での開催を企画したが、新型コロナウイルス感染拡大防止のために残念ながら中止となった。

（3）基礎知識講習会（勉強会・相談会）：各分野の基礎知識理解のための講習会や技術相談会を開催した。例えば、若手合宿期間中にデータ科学班による相談会を実施することで、若手を中心とした生態班×データ科学班によるその後の共同研究展開への重要な布石となった。他にも、統計解析相談会、イベント駆動型ログボット講習会、深層学習による軌跡分析ツール講習会、無線マイコン講習会などを実施した。単独行事としても「Trajectory mining 勉強会」（2017年12月19日東北大学）、「ナビゲーション共同勉強会」（2018年1月6日東大理学部）、「画像処理・データ解析勉強会・相談会」（2018年3月16日東北大学東京分室）、「技術相談会」（2019年12月7日理研日本橋オフィス）、「ちょっと長めの話をする・聞く会」（2019年11月11日長崎大学）などを実施した。

（4）学会 OS・WS・Competition 企画及び発表・交流機会提供：JSME ロボメカ講演会、SICE SI 部門講演会、RSJ 学術講演会、IEEE ICMA、日本神経科学大会等にて生物移動情報学関連の OS や WS を 12 回開催し、多くの若手研究者、学生が発表を行った。また、動物や人の軌跡データセットを公開し、そこから正しい行動を類推するアルゴリズムを競わせる国際的な Competition を 4 回実施し、海外を含む多くの若手研究者、学生が参加した。さらに、領域会議、国際シンポジウムや若手合宿ではポスター発表による研究紹介の場を設け、若手研究者、学生が発表・交流できる場を提供した。

（5）その他

○本科研費で雇用したポスドク：のべ 42 人（2016 年度 3 名、2017 年度 10 名採用、2018 年度 10 名、2019 年度 10 名、2020 年度 9 名）

○若手研究者国際支援活動：総数 11 件。国際活動支援班では、若手研究者が国際的に活躍することを促進し、本領域の国際活動を活性化させるため、多数の海外派遣・招聘支援を実施した。2 週間から 3 か月といった長期派遣を 6 件実施し、ドイツ、イギリス、カナダ、アルゼンチン、台湾などに派遣し、その中の幾つかは本格的な共同研究に発展した。1 週間程度の短期派遣は、4 件実施した。また 1 か月程度の長期派遣招聘（外国人ポスドク・飛龍班ドイツ 1 名、2017 年 5-6 月）も実施することで、国際活動を促進した。

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域は、以下の3名を総括班評価者として迎え、適宜助言および評価を受けてきた。

- ・小田 洋一（名古屋大学 国際機構 特任教授）
- ・合原 一幸（東京大学 特別教授 国際高等研究所 IRCN 副機構長）
- ・荒井 修亮（国立研究開発法人 水産研究・教育機構 理事(水産大学校代表)、京都大学名誉教授）

3名の評価者からの、本領域の5年間に及ぶ研究に関するコメントを以下に掲載する。

小田 洋一

生物が環境の中で生存・生育・繁殖などのために移動するナビゲーションは、本質的な生命活動の一つであり、これまでに長く根気強い研究・調査の歴史があった。しかし、肝心の生物の動きをとらえ解析する技術・手法に限界があり、多くが謎のままであった。この新学術領域は、この長年の謎に迫るために、生態学・生理学・デバイス工学・情報学など、近年まれに見る広範囲の研究者がそれぞれの知恵を絞って挑戦したプロジェクトであった。

具体的には、ごく最近自由に研究に使えるようになったGPSを活用し、超小型で自己制御可能なロガーや発信機など生物の移動を計測する機器や、大規模多次元データを解析するソフトウェアの開発の上に、動物の生態・行動・生理の本質的な問題に着眼した異分野の研究者間の融合が実現し、これまで困難とされてきたいくつもの壁を乗り越え、わずか数年間の間に、次々に新しい発見やこれまでの理解をくつがえす知見が得られた。なかでも、動物行動の重要な局面を抽出して計測する技術や、機械学習・深層学習で行動の特徴を見出す手法は、長期間の計測と動物の移動および行動に関する新たな事象の発見につながった。

例えば、渡り鳥として有名なオオミズナギドリが日本海側からフィリピンへ南下する際に、幼鳥と親鳥の経路が大きく異なることや、海鳥が海上で虫を捕食しているなどこれまでに予想もしない現象が見つかったり、パーキンソン病モデルマウスの行動の指標から、異なる動物種（線虫・昆虫・マウス）のドーパミン系神経疾患に共通する異常行動の特徴が見出された。また、発生音波を手掛かりにしてフィールドを飛び回る集団の中の個々のコウモリの動きをとらえることに成功している。さらに、自由に行動する線虫のニューロン活動を単一細胞レベルでイメージングすることにも成功し、環境変化の積分が行動方向の選択を決めるという意味決定のメカニズムを明らかにするなど、目覚ましい成果をあげた。

これらの発見やそのキイとなった手法は、それぞれ *Current Biology*, *Nature Communications*, *Nature Neuroscience*, *Communication Biology*, *eLife*, *Cell Reports*, *IEEE*, *Advanced Robotics* などトップジャーナルに掲載され、国際的に高く評価され注目されている。2018年9月、この分野の第一線で活躍する海外の研究者を招待して、国際シンポジウムが開催されたが、本学術領域の研究が世界をリードしていることが実感された。

この新学術領域は、異分野融合がきわめて有機的に働き、生物ナビゲーションの研究に大きな風穴を明け、大きな成功を遂げたプロジェクトであり、世界に誇れる研究領域を生み出したと考える。特に工学研究者が対象動物の生息フィールドに出て、現場で最適のデータ解析手法を見出し、それぞれの生物に最適のロガーを開発したり、生態学・行動学・生理学の研究者が人工知能による解析法を身に付けた上での共同研究が、上記の優れた成果につながったと理解している。この融合研究は継続すれば更にもう一段階進んだ成果に結びつき、次の飛躍的な研究を担う若手研究者が育つことは間違いないであろう。

合原 一幸

生物は典型的な複雑系である。複雑系を理解するためには、全体論のみでも要素還元論のみでも不可能である。すなわち、複雑系である生物を深く理解するためには、マクロスコピックな個体(さらには個体群)の振る舞いとミクロスコピックな生体分子、遺伝子動態の双方からのアプローチが不可欠である。しかしながら、近年の生物学研究は、分子生物学やゲノム科学の進歩に立脚した後者のアプローチが主流となって大きな成果を生み出してきた。これに対して、本新学術領域研究「生物ナビゲーションのシステム科学」は、これまで十分に研究されて来なかった前者のアプローチから、生物のナビゲーションに迫る、きわめて重要な研究であった。特に、(1)ナビ計測、(2)ナビ分析、(3)ナビ理解(モデル化)、および(4)ナビモデル検証の4プロセスの循環によって、生物のナビゲーションをシステム科学的手法、情報科学的手法さらには数理科学的手法により体系的に研究する方法論は世界的に見ても極めて新規性、独創性が高く、生物の複雑系としての理解に、これまでにない新しい視座を切り拓くことに成功した。また、制御工学、データ科学、生態学、神経科学の4つのチームが有機的に連携し、かつ数理モデルやデータ駆動型人工知能技術を有効に活用したことが、大きな研究成果に結実した。

本新学術領域の異分野融合による共同研究において、従来ほとんど存在していなかった動物や実験環境を超えた普遍的・統一的な計測・解析技術が確立され、さらにそれを積極的に活用して動物種固有の特徴や動物種を超えた共通性の理解が進んだため、大きな研究成果を上げることが出来た。特に、生物ナビゲーションは、生物の脳と身体との相互作用によってはじめて実現し得るものであるため、本新学術領域研究の成果は、今後の脳・神経科学の基礎研究およびロボティクスや人工知能などの技術開発にも、大きなインパクトを与えるものであり、この意味でも価値が高い。

荒井 修亮

本領域では「ヒトや動物の移動行動を計測し、分析し、モデルとして理解し、検証する」という研究活動を行い、具体的には、制御工学、データ科学、生態学、神経科学という既存の4分野が深く融合することで成立するとされている。5年間の研究期間は長いように思えるが、それぞれ独自の研究分野で活動を行ってきた研究者たちが分野融合を目的とする研究を行うには決して十分といえる期間ではない。(新型コロナウイルス感染症という想定外の事態もあったし。)しかし、総括班・総括班以外の計画研究ならびに公募研究合わせて49件の研究課題の多くにおいては上記4分野を融合させる研究成果を挙げたといえよう。また異分野間の若手研究者の交流と育成を行う目的で行われた弟子入り制度、若手横断合宿、基礎知識講習会などは、従来の学会活動において、こうしたアイデアはあってもその実現(特に異分野間での交流)は困難な試みであり、これらを首尾よく実現したことは評価できる。さらに国際コンペを研究期間中に4回実施したことも特筆に値しよう。本領域に参加して育った若手研究者たちが本領域研究の後継課題(是非とも実現してください!)において、研究リーダーとして活躍することが期待される。

本領域で開発された小型行動記録装置「ログボット」や機械学習による解析ソフト「DeepHL」などは、これからの生態学の研究を”How to research”から、”What to research”へと解放していく研究の基盤になるのではないかと。準備は整った。世界に先駆けた新しい発見が楽しみである。