

領域略称名：生物移動情報学

領域番号：4803

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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～平成32年度

平成30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

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	5
2. 研究の進展状況	7
3. 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	10
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	20
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	22
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	23
9. 総括班評価者による評価	24
10. 今後の研究領域の推進方策	26

研究組織 (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総	16H06535 生物ナビゲーションのシステム科学(総括班)	平成 28 年度 ～ 平成 32 年度	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・教授	10
Y00 支	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 ～ 平成 32 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 ～ 平成 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・多機能バイオリギングシステムの開発	平成 28 年度 ～ 平成 32 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 ～ 平成 32 年度	竹内 一郎	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・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 ～ 平成 32 年度	前川 卓也	大阪大学・情報科学研究科・准教授	1
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 ～ 平成 32 年度	玉木 徹	広島大学・工学研究院・准教授	2
B01 計	16H06541 多次元バイオリギングによる鳥類・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 ～ 平成 32 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 ～ 平成 32 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 ～ 平成 32 年度	高橋 晋	同志社大学・脳科学研究科・教授	2
B02 計	16H06544 コオロギ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 ～ 平成 32 年度	小川 宏人	北海道大学・理学(系)研究科(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 ～ 平成 32 年度	木村 幸太郎	大阪大学・理学研究科・招へい教授	2
総括・支援・計画研究 計12件					
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・講師	1
A01 公	17H05974 長寿命バイオリ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・電子情報学系・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・講師	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	産業技術総合研究所・人工知能研究センター・主任研究員	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・農学研究院・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・先導科学研究科・講師	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(理学部)・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・医学(系)研究科(研究院)・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・助教	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・脳科学総合研究センター・客員研究員	1
B02 公	17H05986 Retrosplenial / Hippocampal Circuit Control of Map Selection (脳梁膨大後部 / 海馬の回路制御による地図選択)	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	Thomas McHugh	国立研究開発法人理化学研究所・神経回路・行動生理学研究チーム・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・岡崎統合バイオサイエンスセンター・教授	1
公募研究 計 19 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

【着想に至った経緯】我々の世界は人・動物・人工物の移動で溢れており、特に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。例えば、大型哺乳類・鳥・昆虫などは100-1000km単位のナビゲーションを行うことがあるが、これには地磁気や太陽光などに基づいた正確な「地球規模の位置情報認識能力」が必要である。また、近距離においても、動物は外部環境から重要な情報を抽出し、情報が欠落すれば推定し、記憶と参照し、適切に経路を選択することで目的地に到達する。しかし、動物の脳がこのような複雑な情報処理を時々刻々と適切に行う仕組みは、現在もわずかしか明らかになっていない。また、脳構造やその複雑さが大きく異なる哺乳類や昆虫などが、類似したナビゲーション能力を示すことも大きな謎である。これら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和相互の関連性を明らかにすることが必須である。

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）。

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。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：先端的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

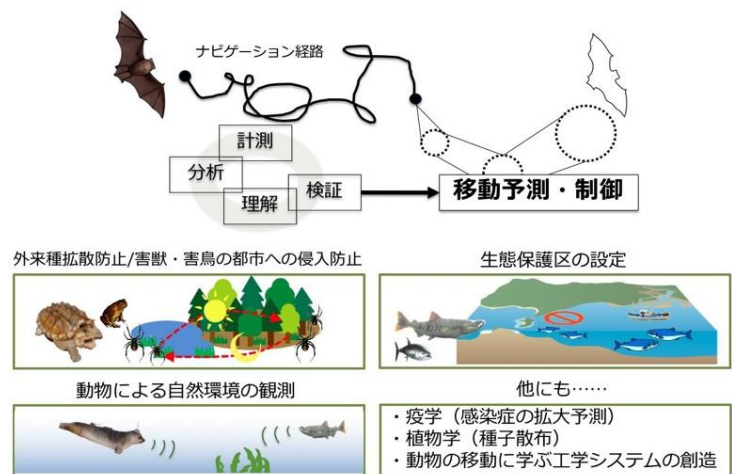


図1 ナビゲーション研究の概要

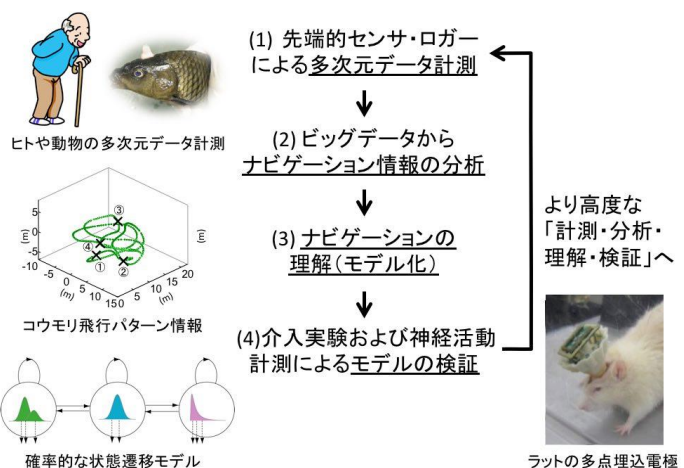


図2 生物ナビゲーションのシステム科学

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。信号処理、メディア(画像・音声など)処理、統計処理を駆使することにより以下の技術を開発し、これをソフトウェアとして整備する。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的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。

【まとめ：既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成】

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)。

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**独創的大型プロジェクト**であり、我が国の学術水準の向上・強化につながる。

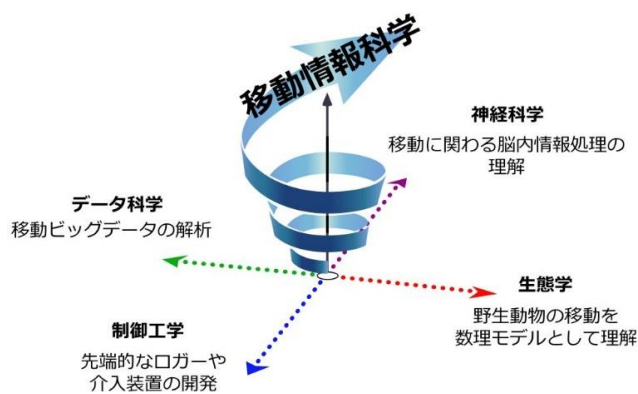


図3 本領域による新たな融合領域の創成

2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

領域全体の目標と進展

目的：本領域では、「計測—分析—理解—検証」のサイクルを回す事で、生物ナビゲーションに関する分野融合的な学問領域を確立する。そのために、A01 制御工学チームと A02 データ科学チームはそれぞれデータ計測およびデータ分析のための「プラットフォーム」となる汎用性の高い装置や技術を開発し、B01 生態学チームと B02 神経科学チームはこれらの装置や技術を野外または実験室内の動物に対して適用し、生物ナビゲーションを数理モデルとして理解することを、第一段階の目標としている。この数理モデルを介入実験により検証し、上記サイクルを発展的に展開させることが第二段階の目標である。

進展状況：これまで2年間、4分野の計画班及び公募班間で活発な融合的研究を行った。まず、A01 を中心として、全く新しい高機能・高汎用性の行動記録装置（ログボット）を開発した。また、A02 を中心として、先端的な機械学習（「人工知能」）技術によるナビゲーションデータ解析のためのさまざまなソフトウェア環境を用途に応じて確立した。さらにこれらを用いて、B01 および B02 を中心として野外または実験室内の動物の画期的なデータ取得を行うと共に、ナビゲーション理解のための数理モデルを作成し、体系化した（p. 11、図7）。これら活動の結果、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、それを活用した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。従って、計画以上に順調に進展したと考えられる。以下に、研究項目ごとに、特に中心となる進展状況に関して、具体的に記述する。

研究項目 A01 制御工学

応募時の設定：ナビ計測のための制御／ロボット技術基盤の整備と高機能ロガーの開発

概要：本領域では、様々な動物のナビゲーション行動を計測するための高機能・高汎用性データロガーをログボット（logbot）と呼び、開発を行った。ログボットは、単にさまざまな情報を計測できるだけでなく、特定の状況下においてロガー機能や介入機能をオン／オフできること（イベント駆動）、また環境充電など（環境駆動）により長寿命化を図るなどという点において、従来のロガーとは根本的に異なる。

(1) イベント駆動型ログボットの開発

現在までに、マルチモーダル計測（緯度経度・加速度・磁気・照度・気圧・水圧・ビデオ）かつ防水機能付き小型ログボット（本体のみ 85×17×15 mm；防水加工後に26 g）を開発した。このログボット（第2世代）は、現在までにウミネコ3個体、オオミズナギドリ2個体、キバナウ4個体、猟犬1個体、クマ1個体に搭載された。

さらに、画期的なイベント駆動型ビデオ録画機能を開発した（図4）。従来のロガーでは、ビデオ録画はバッテリーを大きく消費する事から、短時間の記録のみが可能であった。我々が開発したイベント駆動型ビデオログボットは、事前取得したナビゲーションデータの機械学習分析から得られた加速度パターンから重要なイベント（食餌など）を同定することによってビデオ録画のオンオフを自律制御可能とした。このイベント駆動型ロガーを海鳥の食餌行動に関するバイオリギング研究に適用し、海鳥の50分の行動の中から、わずかに167秒の食餌を効率良くビデオ録画する事に成功した。これは、ロガーによる小型動物の行動記録を根本的に変える成果である（A01橋本、A02前川、B01依田；Korpela et al., 計測自動制御学会 2017）。

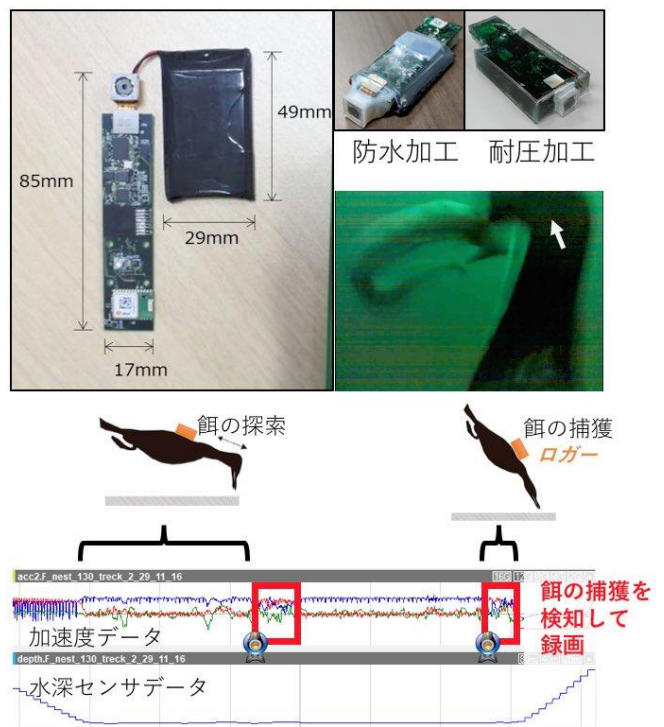


図4 イベント駆動型ログボット：（上）イベント駆動型ログボットとその加工。（中右）海中で撮影された食餌の瞬間。矢印がキバナウの頭部。（下）ロガーに記録されたデータとイベントの検出。

(2) 環境駆動型ロボットの開発

ログロボットではイベント駆動機能に加え、**環境駆動機能**を搭載予定である。環境駆動とは外部環境を能動的に活用し、ローガーの長寿命化、高出力化、多機能化の実現を目指すコンセプトである。これまでクジラの体表を移動できるクジラ用ローバーの試作機を開発し、水流を利用した吸着歩行を深海 500 m で実現した (A01 妻木; 土屋 et al., ROBOMECH 2018)。また、高機動水中ドローンの試作 (Han et al., ICMA 2017)、およびローガーを長寿命化するための環境駆動型アプローチとして風力による発電機能を有する海鳥用ログロボットの試作も行った (A01 妻木、B02 依田; 矢田目 et al., SCI 2018)。また、ローガー回収の効率性を高める高機能化の試みとして、無線による遠隔ローガー分離装置の試作も行っている (A01 妻木; 齋藤 et al., ROBOMECH 2018)。

研究項目 A02 データ科学

応募時の設定：ナビ分析のためのデータ解析基盤の整備とヒトの行動分析

概要：本領域の特色は様々な動物種の様々なナビゲーション行動の類似性と多様性を理解するため、共通の情報技術でデータ分析を行うことである。このため、海洋における海鳥の100km単位の移動からシャーレ内の線虫のmm単位の移動までもカバーする**行動分析のための機械学習アルゴリズムとソフトウェアを開発し**、ヒトも含めて計7種の動物の移動行動分析に適用した。さらに、本領域で得られる技術を社会的課題解決につなげることを目指し、**ヒトの移動行動分析を行うためのシステム開発とベンチマークデータの取得**を行った。

(1) ナビゲーション研究のためのデータ分析基盤

ナビゲーションデータは、動物の位置、状態、環境に関する多次元時系列データの形式で与えられる。多次元時系列データから生物学者が重要な知識を抽出するのは困難であることから、ナビゲーション研究のための多次元時系列データ分析法を新たに構築した。これまでに開発したデータ分析法としては、**深層学習による特徴学習 (A02前川; 図5上; 投稿準備中)**、**部分系列抽出法 (A02竹内; 図5中; Sakuma et al., HCII 2018)**、**逆強化学習による移動経路推定 (A02玉木; 図5下; 論文投稿中)**、**情報利得を用いた行動状態の分類と特徴抽出 (A02前川、B02木村; Yamazaki et al., bioRxiv 2017)**などがある。B01生態班やB02神経科学班との共同研究を通して、これらのデータ分析法が様々な動物種の様々な移動行動の分析に有用であることを実証した。

(2) ヒトナビゲーションの計測と数理モデルによる理解

ナビゲーション研究のベンチマークとして、ヒトの移動行動の計測と分析を行える基盤を構築することを目指した。大量のヒトのナビゲーションデータを取得するには被験者の協力が必要であり、計測基盤を構築し、適切な実験計画をたてる必要があった。現在までに、名古屋工業大学キャンパスに設置された1600個のビーコンを利用して学園祭でイベントを実施し、述べ671人の移動行動データを計測した。このデータを上述の様々な分析法のベンチマークとして利用するとともに、さらなる分析法の開発を加速するための**データ分析国際コンペティション**を実施している (A02竹内、A02前川、A02玉木; p. 21参照)。また、歩行軌跡のクラスタリング、動画像中のアクション認識など、ヒト移動行動の分析技術も開発した (A02玉木)。

研究項目 B01 生態学

応募時の設定：ナビ理解に向けたバイオロギングとナビゲーションのモデリング

概要：公募研究の参加により、本領域で研究対象とする動物種は線虫、昆虫、魚類、鳥類、哺乳類(コウモリ、イヌ、クマ)など数十にわたり、またその移動スケールは数cmから数千kmにもおよぶ。これら動物の多様なナビゲーション行動に対して、共通の計測技術でデータ取得を行い共通の情報技術で分析を行うことで、動物種固有の特徴や動物種を超えた共通性を理解することが初めて可能になった。

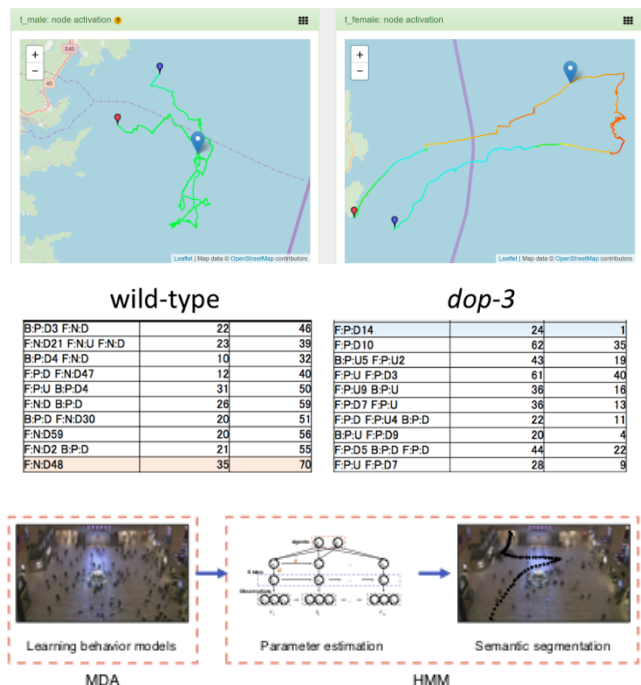


図5 データ分析の結果：(上) 深層学習による海鳥ナビゲーションの特徴。左右にオスとメスの軌跡。メスの軌跡に特徴的な部分が赤色でハイライトされる。(中) 部分系列抽出による線虫の正常株と変異株の特徴。(下) 人移動軌跡の、目的地に応じたクラスタリング。

(1) ナビゲーションデータの取得

生物の多様なナビゲーションを記録する計測手法と演算モデルを作成するために、様々な動物種から移動行動のデータ取得を行った。例えば、球体型移動補償装置 (A01 岩谷と共同開発) やログボットにより、cm スケールで移動する昆虫や 100km スケールで移動する海鳥の移動経路を記録し、解析に資するデータを取得することができた。本項目では、各対象種が抱える個別のニーズに対応するあまり、汎用性が無くならないように注意を払った。そのために、生態学班を中心に A01・A02 を加えた研究会を開催し、目的を共有して強力な共同体制を整えた (p. 20、「6. 研究組織の連携状況」参照)。その結果、例えば潜水する鵜から山林を歩くクマまでカバーできる高い汎用性を備えながら各ニーズに対応できるログボットを開発することができた (Korpela et al., 計測自動制御学会 2017)。

(2) ナビゲーションの数理モデル化

本領域の目標を踏まえ、拡散的・枚挙的にならないように数理モデルの整理を行った。数理モデル化には「データ駆動型」と「知識駆動型」のアプローチがある (詳細次項、p. 11)。データ駆動型研究の目的は、動物の移動行動を網羅的に計測し、データ分析を通して生物学的な仮説を生成することである。代表的成果としては、A02 前川、B01 依田・小池・宮竹、B02 高橋・小川・木村のグループで行った「深層学習を用いた移動比較分析」が挙げられる。この共通手法を用いることによって、性差・年齢 (鳥) やドーパミン伝達 (齧歯類・昆虫・線虫) の違いによって生じる移動経路の差など、ナビゲーションに関する新発見が相次いだ (前川ら、投稿準備中)。もう一つの例としては、A02 玉木・竹内、B01 依田のグループで行った、逆強化学習を用いた動物の移動経路予測である。この成果はデータ科学班が筆頭著者となり、生態学国際誌への受理が近いことからわかるように (Ecosphere、再投稿中)、融合研究が結実した例である。

一方、知識駆動型研究では、生物学者の知識に基づく仮説を検証するため、移動データの計測や解析を行う。この成果としては、GPS 経路から動物が受ける風向・風速と、動物の向き (動物の意志を反映する) を同時推定する統計手法を国際誌 Science Advances に発表した (B01 依田; Goto et al., 2017)。新しく開発したモデルにより、海鳥は目的地からあえてズレた方角を向くことで風に流される効果を相殺し、直線的に目的地に向かえることを示した。本手法は B01 飛龍のコウモリの飛行解析に適用できたことから、高い汎用性が期待できる。この他にも、計画班と公募班の共著論文 (Thiebot et al., Front Ecol Environ 2017) や生物学のトップジャーナルへの掲載 (Yoda et al., Curr Biol 2017) など、融合研究を通して重要な生態学的発見に成功した。

研究項目 B02 神経科学

応募時の設定：ナビ解明に向けた行動・神経の同時計測とナビゲーションの解明

概要：動物のナビゲーション行動の理解を深めるには、行動そのものだけでなく、動物の内部状態を記録・分析する必要がある。B02 神経科学班では、主として野外動物の神経活動計測および実験室内動物の大規模神経活動計測を行うための基盤整備、また、数理モデルの検証を行うために動物への介入実験の基盤整備を行った。

(1) 神経活動計測の一般化と大規模化

渡りや母川回帰など、動物が自然界で行うナビゲーション機能は、ラットやマウスなどの実験動物で調べることは難しい。そこで、B02 高橋が構築した無線神経活動ロガー・システムを活用し、B01 生態学班と共同することで、海鳥 (オオミズナギドリ) とマスの脳から神経細胞活動を計測した (図6; 神経科学学会 2018)。

また、A01 橋本と B02 木村はロボット顕微鏡を用いた線虫での「刺激-神経活動-行動」の同時計測から、「意思決定」のための遺伝子を明らかにした (Tanimoto et al., eLife 2017)。現在このロボット顕微鏡を3次元イメージングに拡張し、全脳神経活動計測とそのモデル化を行っている (Wenら、投稿準備中)。

(2) 介入実験計画

動物の神経活動や行動に応じた高精度な介入実験を行うためのテストケースとして、コオロギの音源定位ナビゲーション解析のためのVR空間の確立 (B02 小川) やロボット顕微鏡 (Tanimoto et al., Sci Rep 2016) を改良したプロジェクションマッピングによる細胞活動フィードバック介入装置 (A01 橋本と B02 木村; 未発表) の開発を行っている。

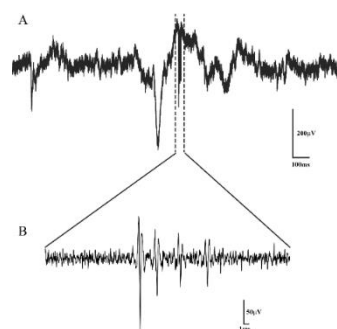


図6 歩行中のオオミズナギドリの終脳から記録した局所脳波 (A) と神経細胞活動 (B)。

3. 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（2 ページ以内）

審査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、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

（審査結果の所見）

（審査員コメント）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、公募研究を含めた研究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。

本領域の目的は計測技術と分析技術を共通化・標準化（プラットフォーム化）することにより、これまで異なる動物種、異なる移動行動ごとに取り組みられてきた動物ナビゲーションの共通点と相違点を明確にし、理解と解明を深化させることである。この目的のもと、これまでの2年間、以下のような取り組みを行ってきた。

（1）計測技術の共通化・標準化

GPS やカメラ、加速度センサ等を搭載した高機能・高汎用性の小型ログボットを開発している。本体部のサイズは85×17×15 mm、重量は26gと小型であり、様々な生物に搭載可能である。製作費は現段階で1台あたり約13万円であるが、希望する公募班には総括班経費で購入した実機を無償で貸与しており、ウミネコ、オオミズナギドリ、キバナウ、ツキノワグマ、猟犬の5種類の動物への搭載実績がある(Korpela et al., 計測自動制御学会 2017)。

（2）解析技術の共通化・標準化

汎用性の高いデータ解析手法の開発を行っている。線虫などのマイクロな動物からクマなどの大型動物まで、さまざまな動物のナビゲーションデータ分析に用いる事で、データ取得周期や空間スケール、欠損値などの違いに強い手法が開発できている。p. 8 に述べた4つの手法(深層学習による特徴学習、部分系列抽出法、逆強化学習による移動経路推定、情報利得を用いた行動状態の分類と特徴抽出)では、それぞれの手法において複数の動物種から新しい知見を導出した。また、提案手法の1つに関しては Web プラットフォームとして実装・領域班員に公開している。生物学者は軌跡の CSV ファイルをアップロードするだけで、深層学習を用いた分析を容易に行うことができ、同一の手法を用いて6種の異なる生物(海鳥、線虫、クマなど)に関する新しい知見を発見できた(A02 前川ら、投稿準備中)。

（3）ナビゲーションデータの共有

様々な動物種の様々なナビゲーション行動を記録したデータを領域内のメンバーにクラウド上で共有している。データフォーマットを可能な限り統一することで、動物種の違い、行動の違いを超えた解析が可能となっている。さらに、海鳥の移動データ、ヒトの移動データに関してはデータ分析コンペティションを開催し(p. 21 参照)、データを公開するだけでなく、その分析技術に関しても領域内外の知見を取り込める工夫を行っている。データ分析コンペティション参加者からのフィードバックを通して、データフォーマット、分析手法の共通化・標準化を促進させていく。

（4）計測技術や分析技術の勉強会や技術相談会の開催

制御工学を専門とするA01の計画班・公募班研究者により計測技術に関して、またデータ科学を専門とするA02の計画班・公募班研究者により分析技術に関して、相談会と勉強会を開催した。さらに、A02の計画班玉木、公募班大西、波部らを中心として動物行動分析のための画像処理勉強会なども開催した(p. 20、「6. 研究組織の連携状況」参照)。これらの相談会、勉強会は主に生物学者をターゲットとしたものであり、A01、A02の研究者の開発した技術を系統的にB01、B02の生物学研究に利用できる体制を整えている。

（5）本領域の成果を社会的課題解決につなげるための取り組み

本領域の成果により、動物のナビゲーション行動の研究ツールを標準化、共通化することができれば、これを様々な社会的課題解決につなげることが期待される。そのような取り組みとして、ヒト移動分析への取り組み(A02 竹内、前川、玉木;国内学会発表2018、データコンペティション 2018)、自動車会社との勉強会・講演会開催(B01 飛龍、A02 竹内; 豊田中央研究所 2017)、風力発電施設設置に対する鳥類リスク地図の作成(B01 依田;未発表)なども行った。

（審査員コメント）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。

本領域の目標は動物のナビゲーション行動をシステムと捉えて、数理モデルによって理解・解明することを目指している。一方、動物の種類、行動の種類は多様であり、単一の数理モデルで説明できるほど単純なものではない。本領域では、数理モデルを広義に捉え、以下の2つの視点からナビゲーション行動のモデルを整理することで、これまで個別に研究されてきたナビゲーションモデルの共通点と相違点を明確化し、学問的な体系化・普遍化を目指している。

[視点1] 「知識駆動型モデル」と「データ駆動型モデル」

知識駆動型モデルとは研究者(生物学者)の知識に基づく仮説を数理モデル化したものであり、問題固有の環境や知識をとり入れた制約の多いモデルとなっている。狭義の数理モデルの多くは知識駆動型モデルである。一方、**データ駆動型モデル**とは動物の**移動行動データ**を多面的かつ網羅的に計測・分析することで新たな仮説の発見を行うことを意図した数理モデル化である。データ駆動型モデルは、近年の人工知能の発展の礎となっている機械学習を用いて行われることが多い。

[視点2] 「行動説明型モデル」と「機能解明型モデル」

行動説明型モデルとは、動物のナビゲーション行動そのものを予測したり、刺激など環境情報と行動の対応関係を説明することを目的としており、主に**生態学分野**で用いられる。一方、**機能解明型モデル**とは動物脳内の神経細胞活動(さらには細胞内で働く遺伝子産物の活性)によってナビゲーションが制御される因果関係を理解することを目的としており、主に**神経科学分野**で用いられる。

これまで、生態学の行動説明型モデルにせよ、神経科学の機能解明型モデルにせよ、既存の知識に基づいた知識駆動型モデルを中心に研究されてきた。しかし、本領域では制御工学、データ科学研究者との連携により、動物の**移動行動と神経活動の網羅的データの計測と機械学習による大規模データ分析が可能となった**。これにより従来の生物学研究では扱われていなかったデータ駆動型モデルによるナビゲーションの理解が可能になっている。さらに、野生動物の神経活動計測、実験動物への生態学的モデル応用など、マイクロなモデル動物を対象とする神経科学とマクロな野外動物を対象とする生態学の間**のたすき掛け的な融合も進めている**。

(審査員コメント) 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。

本領域は、工学を専門とする研究者(A01, A02)と生物学を専門とする研究者(B01, B02)に分かれている。領域代表者の橋本は、これまで、ロボット顕微鏡の開発など、専門とする計測技術を利用した生物学研究のツール開発の研究に取り組んでおり、さまざまな生物学研究者とネットワークを有している。

本領域では、工学研究として開発した計測技術と分析技術を、生物学研究に利用し、その結果をフィードバックすることで工学技術そのものを発展させるスタイルで研究を行っている。そのため、生物学研究者が計測技術と分析技術を使えるようにするための、相談会、講習会を数多く実施しており、工学と生物学の連携を密に行える体制を構築してきた(p. 21、6-(2)-③「基礎知識講習会(勉強会、相談会を含む)」参照)。

実際、ロボットの開発では制御工学を専門とする A01 橋本、データ分析を専門とする A02 前川、生態学を専門とする B01 依田が議論を重ねたことで完成に至り、画期的なデータ取得を行うことができた(Korpela et al., 計測自動制御学会)。また、A02 竹内、前川、玉木らのデータ分析手法構築においては、B01 依田、B02 木村などからデータの提供、結果の解釈を繰り返すことで汎用性の高い分析ツールとなった(いずれも論文投稿中)。また、本コメントを受け、計画班の研究協力者として数理モデルを専門とする生物学者が参画することになり、データ科学的なモデル(データ駆動型モデル)と従来の数理モデル(知識駆動型モデル)との融合を進める体制も整っている。

(審査員・参考意見) 異なる生物を対象とした研究により得られた結果に基づいて共通原理の解明を指向するか否か、指向する場合はその実現可能性についても慎重な判断が望まれるとの意見があった。

生物は多様であり単一のモデルですべての行動を説明するのは適切でなく、共通原理の解明を指向するものではない。本領域のねらいは、計測技術や分析技術などの方法は共通化、標準化することで、様々な種別の様々な行動の共通点と相違点を明確にし、動物のナビゲーションに関する理解を深め、解明を促進することである。

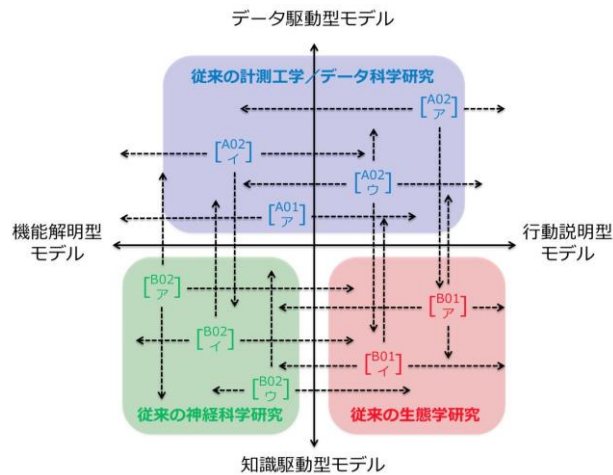


図7 本領域内で研究されている動物ナビゲーションの数理モデル。[A01 ア] 経路マイニングモデル(A01 橋本, A02 竹内)。[A02 ア] 深層学習モデル(A02 前川, B02 木村, B02 小川, B02 高橋, B01 依田, B01 飛龍)。[A02 イ] 系列マイニングモデル(A02 竹内, B02 木村, B02 小川, B01 依田)。[A02 ウ] 逆強化学習モデル(A02 玉木, B01 依田)。[B01 ア] 風向依存型飛行モデル(B01 依田)。[B01 イ] 音響信号モデル(B01 飛龍, B02 小川)。[B02 ア] 行動状態特徴抽出モデル(B02 木村, A02 前川)。[B02 イ] 音源定位モデル(B02 小川, B01 飛龍)。[B02 ウ] 微積分勾配移動モデル(B02 木村)。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

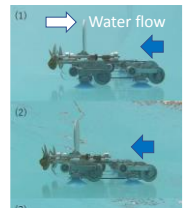
（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

研究項目 A01<計画研究>

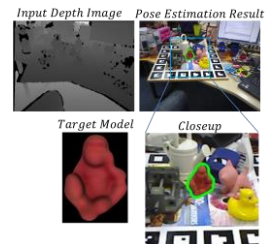
吸着歩行を可能にするクジラ用ローバーの試作機を開発

▲Tsuchiya, K. *et al.* (2018) Whale rover for bio-logging, *IEEE Int. Conf. on AIM* (to be presented). クジラ体表を吸着歩行し、カメラロガーを口元近傍に運ぶために開発したクジラ用ローバーの第4試作機が水流を駆動源として平板上を吸着歩行できることを示した。



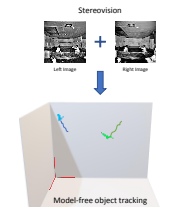
距離画像のみを用いた高速位置姿勢推定手法を開発

▲Li, M. & Hashimoto, K. (2017) Accurate object pose estimation using depth only. *Sensors* 18. 複雑な背景から対象となる物体を正確に抽出することを目的として、3次元センサから得られる距離情報のみに基づいて対象の位置と姿勢を精度よく高速に推定する手法を開発した。



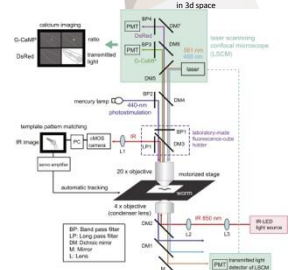
変形する対象物のモデルレス運動推定手法を開発

▲Chen, M. & Hashimoto, K. (2017) Vision system for coarsely estimating motion parameters for unknown fast moving objects in space. *Sensors* 17. 変形する対象の位置と姿勢を推定するために、対象形状のモデルを用いずに対象の運動を推定する手法を開発した。この手法はステレオカメラによりコウモリや鳥などの3次元位置計測に応用できる。



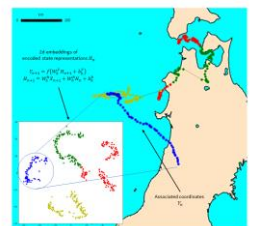
線虫の神経活動と光制御を同時に実現するロボット顕微鏡を開発

▲Gengyo-Ando, K. *et al.* (2017) A new platform for long-term tracking and recording of neural activity and simultaneous optogenetic control in freely behaving *Caenorhabditis elegans*. *J. of Neuroscience Methods* 286, 56-68. 運動する線虫の神経活動と光刺激制御を同時に行いながら長時間の計測を可能とするロボット顕微鏡を開発した。



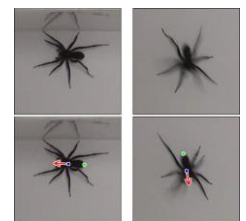
大量の軌跡データから行動の意味を抽出するニューラルネットワークを開発 (B01 依田との共同研究)

▲Ardakani, I. S. & Hashimoto, K. (2017) Encoding bird's trajectory using recurrent neural networks. *Proc. of the IEEE ICMA2017*, 1644-1649. 大量の軌跡データから行動の意味を抽出するためのニューラルネットワークを開発した。海鳥データに適用して、精度のよい軌跡推定が可能となることを実証した。



公募研究 クモの位置・姿勢推定手法を開発

▲Iwatani, Y. *et al.* (2017) Feature-based orientation estimation for wandering spiders from top-view image sequences. *Proc. of the IEEE ICMA2017*, 364-369. 無限平面装置に関わる画像トラッキング手法として、クモの位置・姿勢推定手法を開発した。クモは高速に移動するため画像のぼけが発生するが、開発した位置・姿勢手法はぼけの影響に対してロバストである。



研究項目 A02<計画研究>

系列パターンを発見するための Selective Inference 手法を開発

▲Suzumura, S. *et al.* (2017) Selective inference for sparse high-order interaction models. *Proceedings of International Conference on Machine Learning 2017 (ICML2017)*. ナビゲーションデータからの知識発見においては、大量の観測データから回帰や分類に有用な組み合わせ要因や系列パターンを抽出することが求められる。本論文では、抽出された組み合わせ要因や系列パターンの統計的有意性を適切に定量化するための Selective Inference と呼ばれるアプローチを開発した。従来は多重検定と呼ばれる過度に保守的な方法しか存在していなかったが、提案法



提案法で発見した男女で統計的有意差のある移動軌跡

を用いることで、統計的信頼性の担保された組み合わせ要因や系列パターンを見つけることができるようになった。

イベント駆動型ロガーを開発 (A01 橋本、B01 依田との共同研究)

▲Korpela, J. *et al.* (2017) Preliminary analysis of realtime classification of feeding activity for the streaked shearwater. 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. センサデータロガー上の加速度センサや GPS などの低消費電力なセンサを用いて、生態学者が興味のある動物の行動を機械学習により認識し、消費電力の大きいカメラをその行動が認識されたときのみ起動する手法を提案した。キバナウ（鶉の一種）やウミネコでその有効性を確認した。(優秀講演賞受賞)



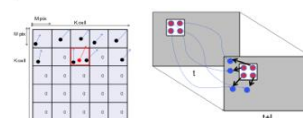
ウミウの採餌シーン



防水加工 耐圧加工

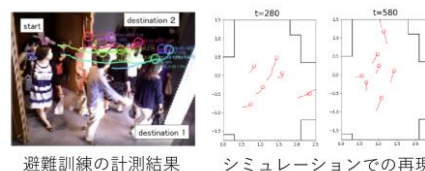
深層学習よりも精度の高い人物行動認識の手法を開発

▲Matsui, K. *et al.* (2017) Trajectory-set feature for action recognition, *IEICE Transactions on Information and Systems* E100.D, 8, 1922-1924. 映像中の特徴点の軌跡分布に着目した trajectory set 特徴量を提案し、動作認識へ適用した。人物動作を収集した評価用データセットである UCF101 と HMDB51 に対して実験を行い、HMDB51 の認識率 (85.4%) は深層学習手法の性能 (80.2%) を上回ることが示された。



公募研究 群集における歩行者移動モデルを構築

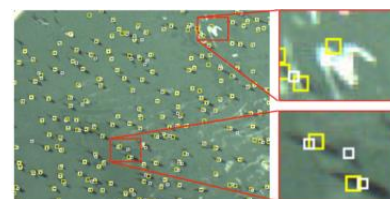
大西ら (未発表) 群衆の一人ひとりの移動軌跡を計測し、深層学習を用いてモデル化することで未知環境での人の移動を再現できることを確認した。さらには移動中に目的地を選択できるような人の移動モデルを提案し、大規模な避難訓練の計測実験で見られた避難中の目的地変更が起きた場合の移動軌跡が再現できることを確認した。



避難訓練の計測結果 シミュレーションでの再現

映像中の様々な小動物を安定的に検出する手法を開発

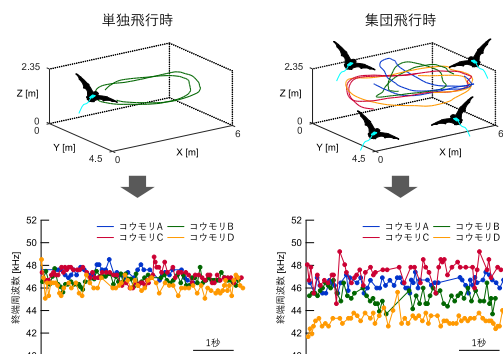
佐藤僚太, 波部斉, 阿部孝司, 井口信和. (2017) CNN を用いた画像解析による大規模魚群の個体検出手法, *SI2017*. 映像中から稚魚などの小動物を検出する手法を提案した。クロマグロ稚魚を撮影した映像に適用したところ、明るい照明条件では 82.0%、暗い条件でも 79.2% の精度で個体検出が可能であることを確認した。



研究項目 B01<計画研究>

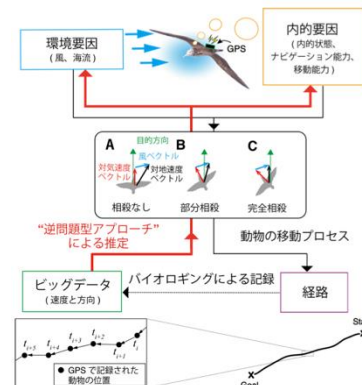
コウモリが互いの超音波周波数を変え混信を回避することを発見

▲Hase, K. *et al.* (2018) Bats enhance their call identities to solve the cocktail party problem. *Communications Biology* 1:39. 集団で飛行する際、お互いのコウモリが超音波の周波数を調整し合うことで混信を回避していることを発見した。これよりコウモリが、集団移動中のナビゲーションモデルや、多数の自律センシングロボットの群制御などの技術シーズの着想につながることを期待される。新聞各社による発表のほか、Nature 関連誌によるハイライト記事としても紹介された。



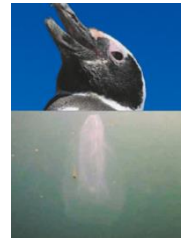
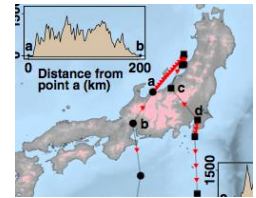
逆問題アプローチを用いた動物の認知を推定する手法を開発

▲Goto, Y. *et al.* (2017) Asymmetry hidden in birds' tracks reveals wind, heading, and orientation ability over the ocean. *Science Advances* 3, e1700097. システム同定 (入出力情報から内部システムを推定) の考え方にに基づき、GPS 経路から動物が受ける風向・風速と、動物の向き (動物の認知に相当) を同時推定する統計手法を開発した。海鳥が目的地からあえてズレた方角を向くことで風に流される効果を相殺し、直線的に目的地に向かえることが明らかになった。



ミズナギドリ目の幼鳥が山脈を越えることを初めて発見

▲Yoda, K. *et al.* (2017) Compass orientation drives naïve pelagic seabirds to cross mountain ranges. *Current Biology* 27, R1152-1153. 海上以外は飛翔しないと考えられていた海鳥種の幼鳥が山脈を越えることを初めて発見し、成鳥とのルート比較から長距離ナビゲーションのルート獲得過程を明らかにした。



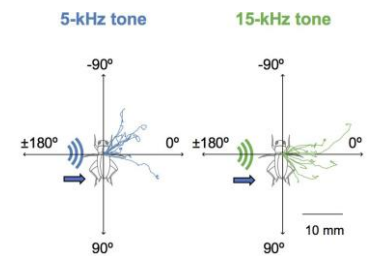
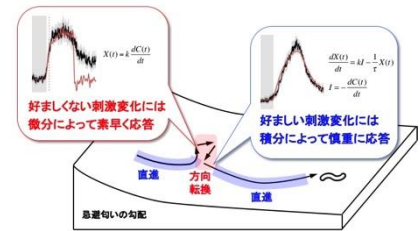
公募研究 捕食者の大規模移動を利用して、クラゲの生態を解明 (B01 依田との共同研究)

▲Thiebot, J.-B. *et al.* (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. 世界各地に生息するペンギンにビデオを装着し、クラゲを多く捕食していることを明らかにした。海洋を広く移動する高次捕食者を用いて謎に包まれたクラゲの分布や生態を調べることができることを示した。

研究項目 B02<計画研究>

線虫匂いナビの「匂い刺激」と「意思決定」の関連を微分・積分で数理モデル化し、遺伝子実体も解明 (A01 橋本との共同研究)

▲Tanimoto, Y. *et al.* (2017) Calcium dynamics regulating the timing of decision-making in *C. elegans*. *eLife* 6, 13819. 線虫は匂い濃度の微分と積分によって、高等動物と同様に「意思決定」すること、またこれに関する遺伝子を明らかにした。ロボット技術による正確な測定、数理モデル、遺伝子同定が高度に結びついた、本領域を代表する重要な成果である。(F1000Prime 推薦論文)

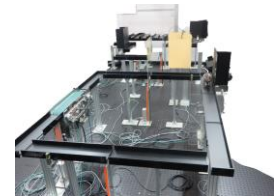


コオロギの逃避ナビゲーションが聴覚状況によって変化することを発見

▲Fukutomi, M. & Ogawa, H. (2017) Crickets alter wind-elicited escape strategies depending on acoustic context. *Scientific Reports* 7, 15158. コオロギの気流誘導性逃避行動において、捕食者であるコウモリの探針音波と同様の高周波音を気流刺激に先行して提示すると、逃げる距離が長くなり、横からの刺激に対しては移動方向が後方へ偏ることを見いだした。

環境介入するための再構成可能な迷路を開発

「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(2017)年 12 月 27 日. 環境介入装置として、迷路を構成する通路、センサ、可動壁、給餌器、トレッドミルなどの構成要素を自在に再構成可能な迷路を開発し、その特許を出願した。同一環境下で様々な迷路形状を構成できるため、環境介入によるナビゲーション移動モデルの検証が可能になった。



ナビゲーション軌跡を「状態」に分類し、その特徴を抽出する統一的手法を確立 (A02 前川、B01 飛龍との共同研究)

▲Yamazaki, S. J. *et al.* (2017) Experience-dependent modulation of behavioral features in sensory navigation of nematodes and bats revealed by machine learning. *bioRxiv* 198879. 機械学習手法を用いて、コウモリや線虫ナビゲーションの行動状態から特徴を抽出する手法を確立した。本手法により、効率的に統一された手法で様々な動物のナビゲーションを解析することが可能になった。



5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究発表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

<発表論文>

研究項目 A01

【計画班 橋本】

- ▲*Li, M. & Hashimoto, K. (2017) Accurate object pose estimation using depth only. *Sensors* 18(4). 査読有
- ▲*Chen, M. & Hashimoto, K. (2017) Vision system for coarsely estimating motion parameters for unknown fast moving objects in space. *Sensors* 17(12). 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
- ◎▲Ardakani, I. S. & *Hashimoto, K. (2017) Encoding bird's trajectory using recurrent neural networks. *Proc. of the IEEE ICMA2017*, 1644-1649. 査読有

【計画班 妻木】

- ▲*Tsuchiya, K., Suzuki, A., Tsumaki, Y., Mori, K. (2018) Whale rover for bio-logging. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, July, 2018. 査読有
- ▲*Han, H. K., Hiwatashi, M., Toyoshima, T., Tomori, H., Tsumaki, Y., Mori, K. (2017) Underwater Drone for Bio-logging of Sperm Whale, *Proc. of the IEEE ICMA2017*, 376-380. 査読有
- ◎▲*妻木勇一, 森恭一. (2017) 生物の謎に挑むロボットテクノロジー. *日本ロボット学会誌*, Vol. 35, No. 6, pp. 463-466. 査読無

【公募班 岩谷】

- ▲*Iwatani, Y., Tsurui, K., Honma, A. (2017) Feature-based orientation estimation for wandering spiders from top-view image sequences. *Proc. of the IEEE ICMA2017*, 364-369. 査読有

【公募班 小林】

- *Kobayashi, H. H., Kudo, H., Glotin, H., Roger, V., Poupard, M., Shimotoku, D., Fujiwara, A., Nakamura, K., Saito, K., Sezaki, K. A. (to appear in 2018) Real-time streaming and detection system for bio-acoustic ecological studies after the Fukushima accident. *MTAP special issue*. 査読有

研究項目 A02

【計画班 竹内】

- ▲Hanada, H., Shibagaki, A., Sakuma, J., *Takeuchi, I. (2018) Efficiently monitoring small data modification effect for large-scale learning in changing environment. *Proceedings of The Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI2018)* 1314-1321.
- ▲Kanamori, K., Toyoura, K., Honda, J., Hattori, K., Seko, A., Karasuyama, M., Shitara, K., Shiga, M., Kuwabara, A., *Takeuchi, I. (2018). Exploring a potential energy surface by machine learning for characterizing atomic transport. *Physical Review B*. Vol. 97, 125124. 査読有
- ▲Suzumura, S., Nakagawa, K. Umezumi, Y., Tsuda, K., *Takeuchi, I. (2017) Selective inference for sparse high-order

interaction models. Proceedings of International Conference on Machine Learning 2017. 査読有

▲Suzumura S., Ogawa K., Karasuyama M., Sugiyama M., *Takeuchi I. (2017). Homotopy continuation approaches for robust SV classification and regression. Machine Learning. Vol. 106(7), pp. 1009-1038. 査読有

【計画班 前川】

▲Yoshimura, N., *Maekawa, T., Amagata, D., Hara, T. (2018) Preliminary investigation of fine-grained gesture recognition with signal super-resolution. Proc. of IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2018), Work-in-Progress session. 査読有

▲Dissanayake, T., *Maekawa, T., Amagata, D., Hara, T. (2018) Preliminary investigation of detecting events of indoor objects with smartphone active sound sensing. Proc. of IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2018), Work-in-Progress session. 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 (2018) 動物移動行動データからの高速な頻出共起ルール抽出に関する検討. 第 10 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM フォーラム 2018) . 査読無

◎▲東出大輝, *前川卓也, 天方大地, 原隆浩, 水谷友一, 鈴木宏和, 依田憲 (2018) 生物移動情報分析における個体属性差による行動差異の発見支援. 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会. 査読無

▲Ohara, K., *Maekawa, T., Matsushita, Y. (2017) Detecting state changes of indoor everyday objects using Wi-Fi channel state information. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), Vol. 1, Issue 3, No. 88 (Presented at UbiComp 2017) 査読有

▲*Maekawa, T., Sakumichi, Y. (2017) Easy to install indoor positioning system that parasitizes home lighting. Proc. of 2017 European Conference on Ambient Intelligence (AmI 2017), pp. 124-129. 査読有

▲Ohara, K., Hayashi, T., *Maekawa, T., Matsushita, Y. (2017) Metric structure from motion by indoor localization using Wi-Fi channel state information. Proc. of 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2017), pp. 352-357. 査読有

◎▲*鮫島正樹, 前川卓也, 岸野泰恵, 中井淳一, 依田憲 (2017) バイオロギングのためのイベント駆動型ロガーの開発. ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2017. 査読無

◎▲*Korpela, J., Samejima, M., Maekawa, T., Kishino, Y., Nakai, J., Matsumoto, S., Yoda, K., Muraio, K. (2017) Preliminary analysis of realtime classification of feeding activity for the streaked shearwater. 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

【計画班 玉木】

▲*Ogawa, D., Tamaki, T., Raytchev, B., Kaneda, K. (2018) Semantic segmentation of trajectories with agent models. in Proc. of The International Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2018), Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido, Japan, February 21-23. 査読有

▲Matsui, K., *Tamaki, T., Raytchev, B., Kaneda, K. (2017) Trajectory-set feature for action recognition. IEICE Transactions on Information and Systems Vol. E100.D No. 8 pp. 1922-1924. 査読有

◎▲*Hirakawa, T., Yamashita, T., Yoda, K., Tamaki, T., Fujiyoshi, H. (2017) Travel time-dependent maximum entropy inverse reinforcement learning for seabird trajectory prediction. In Proc. of Asian Conf. on Pattern Recognition (ACPR2017), pp. 430-435, 2017. November 26-29, 2017, International Conference Hotel Nanjing, Nanjing, China. 査読有

【公募班 柳井】

▲*Ege, T. & Yanai, K. (2017) Image-based food calorie estimation using knowledge on food categories. Ingredients and Cooking Directions, Proc. of ACM Multimedia Thematic Workshops on Understanding, Mountain View. 査読有

【公募班 波部】

*佐藤僚太, 波部 斎, 阿部孝司, 井口信 (2017) CNN を用いた画像解析による大規模魚群の個体検出手法. SI2017.

査読無

【公募班 大西】

*西田遼, 橋本浩一, 大西正輝 (2018) Social Force Model を用いた目的地選択可能な歩行者モデルの提案. 第62回システム制御情報学会研究発表講演会. 査読無

研究項目 B01

【計画班 依田】

▲*依田憲. バイオロギングによる行動学：海洋動物の長距離ナビゲーションを例として. (in press) Japanese Journal of Animal Psychology. 査読有

▲*Yoda, K., Shiozaki, T., Shirai, M., Matsumoto, S., Yamamoto, M. (2017) Preparation for flight: pre-fledging exercise time is correlated with growth and fledging age in burrow-nesting seabirds. Journal of Avian Biology 48, 881-886. 査読有

▲*Müller, M., Vyssotski, A. L., Yamamoto, M., Yoda, K. (2017) Heart rate variability reveals that a decrease in parasympathetic ('rest-and-digest') activity dominates autonomic stress responses in a free-living seabird. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology 212, 117-126. 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】

▲*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

▲Motoi, K., Sumiya, S., Fujioka, E., *Hiryu, S. (2017) Three-dimensional sonar beam-width expansion by Japanese house bats (*Pipistrellus abramus*) during natural foraging. Journal of Acoustical Society of America 141, 439-444. 査読有

▲Sumiya, M., Fujioka, E., *Hiryu, S. (2017) Coordinated control of acoustical field of view and flight in three-dimensional space for consecutive capture by echolocating bats during natural foraging. PLOS ONE 12(1): e0169995. 査読有

【公募班 小池】

▲*Tochigi, K., Masaki, T., Nakajima, A., Yamazaki, K., Inagaki, A., Koike, S. (in press) Annual variation in detection of arboreal feeding signs by Asiatic black bear: effects of hard mast production by various tree species at individual tree and regional scale. Journal of Zoology. 査読有

【公募班 木下】

*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

【公募班 佐倉】

▲*Kimura, K.D., Sato, M., Sakura, M. (in press) Neural mechanisms of animal navigation. Proceedings of 6th International Conference on HCI International 2018. 査読無

【公募班 宮竹】

▲Matsumura, K., *Miyatake T. (in press) 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. 査読有

【公募班 永澤】

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

【公募班 高橋】

▲*Takahashi, A., Ito, M., Nagai, K., Thiebot, J.B., Mitamura, H., Noda, T., Trathan, P.N., Tamura, T., Watanabe, Y.Y. (2018) Migratory movements and winter diving activity of Adélie penguins in East Antarctica. *Marine Ecology Progress Series* 589, 227-239. 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

研究項目 B02

【計画班 高橋】

▲Mizutani, K., Takahashi, S., Okamoto, S., Karube, Y., *Fujiyama, F. (2017) Substance P effects exclusively on prototypic neurons in mouse globus pallidus. *Brain Structure and Function*. 222, 4089–4110. 査読有

▲*Ishino, S., Takahashi, S., *Ogawa, M., Shakurai, Y. (2017) Hippocampal-prefrontal theta phase synchrony in planning of multi-step actions based on memory retrieval. *European Journal of Neuroscience* 45, 1313-1324. 査読有

▲Oh, Y.M., Karube, Y., Takahashi, S., Kobayashi, K., Takada M., Uchigashima, M., Watanabe, M., Nishizawa, K., Kobayashi, K., *Fujiyama, F. (2016) Using a novel PV-Cre rat model to characterize pallidonigral cells and their terminations. *Brain Structure and Function*. 222, 2359-2378. 査読有

「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】

▲Someya, M., *Ogawa, H. (in press) Multisensory enhancement of burst activity in an insect auditory neuron. *Journal of Neurophysiology*. 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

▲Sato, N., Shidara, H., *Ogawa, H. (2017) Post-molting development of wind-elicited escape behavior in the cricket. *Journal of Insect Physiology* 103, 36-46. 査読有

▲*Ogawa, H., Sato, N., Fukutomi, M. (2017) Action selection for escape behavior in the cricket. *The 44th Naito Conference on Decision Making in the Brain–Motivation, Prediction, and Learning Program & Abstract*: 114. 査読有

◎▲小川宏人 (2016) 昆虫の短中距離ナビゲーションを支える神経基盤, *日本ロボット学会誌*, 34: 685-689. 査読無

【計画班 木村】

◎▲谷本悠生、*木村幸太郎 情報の微分・積分による線虫の意思決定 (2018) *生物物理* vol. 58 (2) 83-85. 査読有

◎▲Tanimoto, Y., Tanimoto, Y., Yamazoe-Umemoto, A., Fujita, K., Kawazoe, Y., Miyanishi, 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

◎▲Yamazaki, S. J., Ikejiri, Y., Hiramatsu, F., Fujita, K., Tanimoto, Y., Yamazoe-Umemoto, A., Yamada, Y., Hashimoto, K., Hiryu, S., Maekawa, T., *Kimura, K.D. (2017) Experience-dependent modulation of behavioral features in sensory navigation of nematodes and bats revealed by machine learning. *bioRxiv* 198879. 査読無

【公募班 豊島】

◎▲*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

【公募班 北西】

Kitanishi, T., *Matsuo, N. (2017) Organization of the claustrum-to-entorhinal cortical connection in mice. *Journal of Neuroscience* 37: 269-280. 査読有

【公募班 武藤】

▲*Muto, A., Kawakami, K. (in press) 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. 査読有

【公募班 佐藤】

▲*Kimura, K.D., Sato, M., Sakura, M. (in press) Neural mechanisms of animal navigation. Proceedings of 6th International Conference on HCI International 2018. 査読無

【公募班 McHugh】

Middleton, S. J., Kneller, E. M., Chen, S., Ogiwara, I., Montal, M., Yamakawa, K., *McHugh, T. J. (in press) Altered hippocampal replay is associated with memory impairment in mice heterozygous for the SCN2A gene. Nature Neuroscience. 査読有

<ホームページ・新聞等>

- ・生物移動情報学の創設 HP:<http://navi-science.org/>
 - ・ニューズレターの発行：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 (<http://navi-science.org/newsletter1/>)& Vol.2 (<http://navi-science.org/newsletter2/>)
 - ・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の解決を図る(計画班 B01 飛龍) <https://www.natureasia.com/ja-jp/research/highlight/12489> 2018/5/3
 - ・読売新聞 海鳥の幼鳥 危険な内陸飛行 (計画班 B01 依田) 2018/2/9
 - ・読売新聞 海鳥目線 AIで撮影 (計画班 A02 前川) 2017/9/29
 - ・読売新聞 生物の「空の羅針盤」探る (計画班 A01 橋本、A02 前川、B01 依田、飛龍、B02 高橋) 2017/9/22
 - ・読売新聞 「線虫」周囲分析し意思決定 (計画班 B02 木村) 2017/6/30
- 他多数

<主催シンポジウム等の状況>

- ・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

<アウトリーチ活動>

- ・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!ー生物に学ぶ音の物理ー 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「行動の科学」 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 10 件

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

（1）領域内の研究組織と領域において設定している各研究項目との関係

本領域では、生物ナビゲーションの①計測—②分析—③理解—④検証を1サイクルとして、ナビゲーション研究のためのシステム科学的な方法論を整備し、さらにこの方法論を動物やヒトの行動分析に適用し、生物学的発見や社会的課題解決を目指すことを、基本的な研究目標と位置づけている。この研究目標を実現するため、①～④をそれぞれ担当する制御工学(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。

A01 制御工学チームは、ナビ計測に関する制御工学・ロボット工学技術を発展させ、最先端ロギングデバイスやフィードバック介入装置開発を行う。**A02 データ科学チーム**は、ナビ計測により得られたデータ分析の基盤を整備するとともに、ヒト行動計測を行う。**B01 生態学チーム**は、バイオロギングにより動物のナビゲーションデータを取得し、生体・環境情報とナビゲーションの関係を理解可能にする数理モデルを作成する。**B02 神経科学チーム**は、動物の行動と神経活動を同時計測し、ナビゲーション機能の神経基盤を明らかにすると共に、介入実験によりモデルを検証する。なお、H29 年度に 19 の公募班が

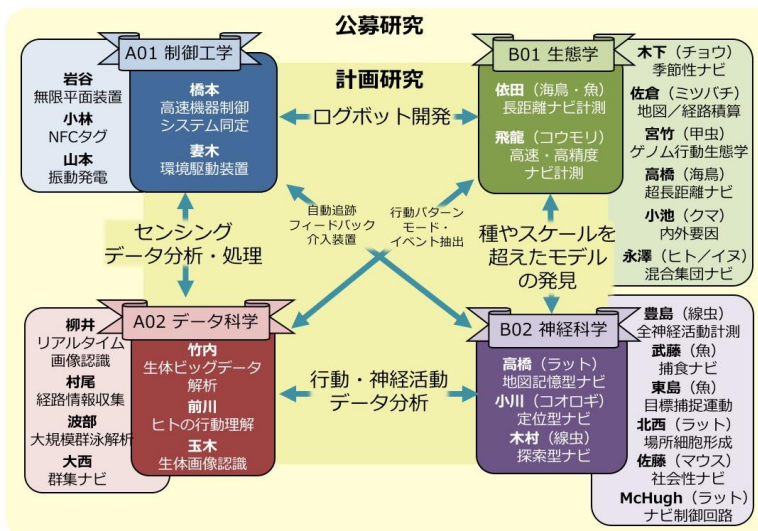


図8 本領域の連携体制

加わったことにより、ナビゲーション空間、無線通信、振動発電、画像認識、ヒトや動物の群衆行動分析に対する技術が拡充され、また、大型哺乳類や昆虫の野外ナビゲーションの解析、および研究室でのマウス・ラット・ゼブラフィッシュ・線虫のナビゲーションと神経活動の解析が拡充された。これにより、種やスケールを超えたヒトと動物のナビゲーションを多様な角度から解析するための環境が整った。

（2）研究組織間の連携を推進するための活動の実施状況

1で記載した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。特に、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するような融合的研究活動（例えば、特定の動物のナビゲーションの研究に制御工学・データ科学・生態学・神経科学のすべての分野から取り組む事）が特に有効である。しかし生工数連携や異分野融合の困難さは、それぞれの文化のみならず言葉が簡単には通じないことが原因である。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、総括班、国際活動支援班を中心として、図9に示すような領域支援体制を組織した。

これまでに領域会議 2 回、領域運営会議 11 回のほか、特に「(1) 生物系研究者に対する組織的な技術支援」、「(2) 融合的研究者育成支援（異分野弟子入り、若手横断合宿、基礎知識講習会など）」、「国際活動支援（若手派遣、招聘、国際コンペティション）」に重点をおいた下記の様な活動を行ってきた。(p. 22、「若手研究者の育成に係る取り組み状況」にも記載)

①異分野弟子入り（共同研究先に短～中期滞在）するための費用支援
 現在までの弟子入り延べ人数:19名、回数:30回、弟子入り総期間:45日

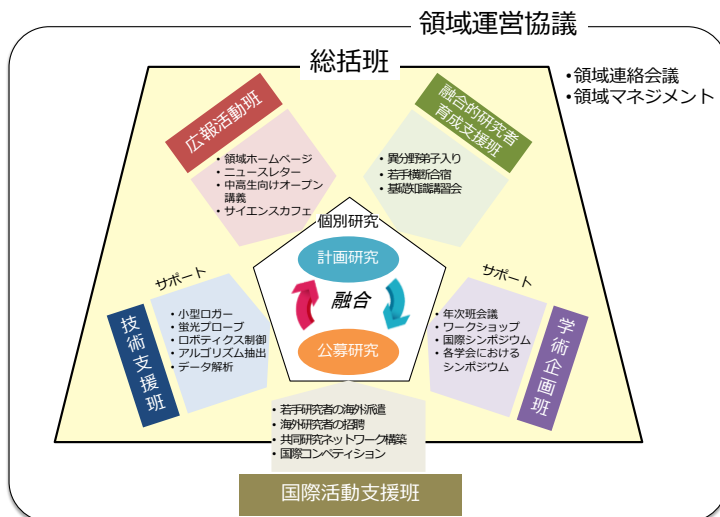


図9 本領域の支援体制

②若手横断合宿

1回目 平成 28 年 11 月 25-26 日、大阪大学豊中キャンパス、参加者:33 名

「情報×生態」を中心として、生態学的データの情報学的解析手法に関するセミナーや意見交換、相談会などを実施した。

2回目 平成 29 年 9 月 9-10 日、北海道地区国立大学大滝セミナーハウス、参加者:56 名

若手の研究発表だけでなく、2 日目にグループワークを実施した。4つの分野(工学、データ科学、生態、神経)をまたいで5-6名のグループを作り、分野横断の共同研究テーマなどをディスカッションして、その企画内容を2日目にグループ毎にプレゼンし議論した。またその合間を縫って統計解析相談ワークショップを実施した。

③基礎知識講習会(勉強会、相談会を含む)

若手横断合宿とは別に、研究代表者を主な対象とした領域内の基礎知識講習会を計4回行った。

- 工学×生態学勉強会 平成 28 年 10 月 7 日、東北大学、参加者:8 名
- 「バイオリギング×情報科学 座談会」(バイオリギング研究会ワークショップ) 平成 28 年 12 月 3 日、同志社大学、参加者:48 名
- トラジェクトリー・マイニング勉強会 平成 29 年 12 月 19 日、東北大学、参加者:23 名
- ナビゲーション共同勉強会 平成 30 年 1 月 6 日、東京大学理学部、参加者:43 名
- 画像処理勉強会・相談会 平成 30 年 3 月 16 日、東北大学東京分室、参加者:38 名

さらにこのような研究項目間の連携を図るための組織活動の他に、具体的な技術支援としてログボットの提供(総括班として9台を購入し、計画・公募合わせて3班に提供)とデータ解析用オンラインプラットフォームの構築を行った。

④国際活動支援

- 若手研究者の相互派遣:6 名(北米、英国、独国、カナダ、ベルギー、アルゼンチン)
- 国際コンペティション開催:2回 (<https://competitions.codalab.org/competitions/16283>, 17401)
- 国際チュートリアルワークショップ:国際会議 (IEEE ICMA) 平成 29 年 8 月 6 日

⑤雑誌連載企画(日本ロボット学会誌および生物の科学「遺伝」)

- アウトリーチ活動の一環として、日本ロボット学会誌に計画班代表者9名によって、本領域に関わる記事を平成 28 年 10 月から平成 29 年 10 月まで連載した。
- 「生物の科学『遺伝』」誌に生態班及び神経班の計画班代表者によって、特集記事「生物のナビゲーションを科学する」を執筆した(平成 29 年 6 月)。その後、公募班代表者を中心に、同タイトルによる連載記事をスタートさせ、2年間にわたる連載を行っている。これらの記事を最終年度には書籍として発行することも計画している。

(3) 研究組織間の連携状況

(2)で記載した連携推進活動の結果として、現在までに表1に示すような領域内共同研究が行われており、その数は 40 にのぼる。そのうち計画班間によるもの 19、計画班と公募班によるもの 17、公募班間によるもの 4 である。表1にみられるように 4 チームすべての間で共同研究が進行しており、特に A01 と B01 または B02、および A02 と B01、B02

の間で活発な共同研究が立ち上がっている。共同研究を実施するための研究打ち合わせ回数は平成 28 年度が 35 回(いずれも計画班のみ)、平成 29 年度は 92 回(うち計画班のみが 73 回、公募班も含めたものが 7 回)行われている。特に公募班との共同研究は開始されて一年のプロジェクトであり、まだ具体的な研究成果は多くないが、今後より研究班間の連携による融合的研究成果があげられるものと期待される。

To \ From	A01 制御工学	A02 データ科学	B01 生態学	B02 神経科学
A01 制御工学		●ログボット ●制御ソフトウェア	●ログボット ●動物駆動発電装置	●ロボット顕微鏡 ●無限平面装置 ●新規 Ca センサー
A02 データ科学	●ログボットによる計測 スペックに関する助言		●移動軌跡データ解析 ●画像による位置/行動推定	●機械学習による行動 解析、イベント抽出 ●細胞認識アルゴリズム ●神経活動データ解析 ●巡回統計解析
B01 生態学	●イベント駆動型ログボ ットへのフィードバック	●軌跡データ画像・音声 データの提供 ●行動要素の生物学的 意味づけ		●音場計測とシミュレー ション ●昆虫聴覚器官の CT 解 析
B02 神経科学	●行動追跡、介入装置 へのフィードバック	●行動と神経活動の同 時計測データの提供	●野外での神経活動計 測技術	

表 1 領域内共同研究における連携概要

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

平成28年度は116人の領域メンバーのうち38人が、平成29年度は127人中44人が若手研究者であった。

（1）異分野弟子入り制度 総数30回：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を目的とした。これまでのところ弟子入り30件の実績を通じて、学部4年生から若手研究者（ポスドク、助手）のべ19人が利用した。具体的には生態班×神経班（7件、例：サケや鳥の脳波計測（B01依田G→B02高橋G）、コウモリ神経生理システム導入に向けたテロード電極作成（B01飛龍G→B02高橋G））、神経班×データ科学班（9件、例：線虫ナビゲーション解析（B02木村G→A02前川G））、生態班×データ科学班（8件、例：画像撮影・解析（B01飛龍G→A02玉木G））、神経班×制御工学班（線虫追跡プログラム（B02木村G→A01橋本G））などに関する知識及び技術取得が行われ、異分野との活発な交流を通じた若手育成が計画通り図られた。

（2）若手横断合宿 2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。2016年11月25-26日大阪大学（参加者33名）では、2件の若手を含む6件の発表に対して熱心な議論が行われた。また第2回若手合宿は2017年9月9-10日北海道大学セミナーハウス（参加者56名）に、初日は若手参加者によるショートプレゼンテーション22件を実施し、2日目は異分野横断の若手チームで研究のシーズ・ニーズの議論を行い、共同研究提案を発表した。シニアを含む参加者から活発な討論やアドバイスが繰り返された。

（3）基礎知識講習会（勉強会・相談会）4回：各分野の基礎知識理解のための講習会を、年次領域会議や若手横断合宿と共に開催した。特に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。また「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）では7件のシニアによる発表を通じて、最新の画像処理技術やナビゲーション研究への応用展開に関するレクチャーを学生や若手研究者を交えて実施した。

（4）領域メンバーの主な受賞 総数 30 件：動物行動学会最優秀賞や生態学会優秀賞など、領域に係る多くの若手研究者や学生らが、当該プロジェクトの研究成果において賞を受賞した。

（5）その他

○本科研費で雇用するポスドク のべ 13 人（2016 年度 4 名、2017 年度 9 名採用）

○若手研究者国際支援活動 総数 6 件（海外派遣（牧口助教、2016 年 10-11 月、5 件）、招へい（外国人ポスドク・飛龍班ドイツ 1 名、2017 年 5-6 月）

○若手研究者筆頭論文総数 41 件ほか、当該領域オーガナイズドセッションにおける若手学生・研究者による多数の学会発表を行った。学生や若手研究者らに積極的に発表する機会を与えることで、活性化と研究の加速を図った。

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

総括班にはH28年度に400万円、H29年度に730万円の予算を配分した。総括班として共有設備は購入していない。領域研究を円滑かつ効果的に推進するため、予算を使用して総括班が取り組んできた主たる活動を以下に示す。

(1) 領域運営協議(921 千円)

- 領域運営会議:計画班代表者を中心に、2年間で11回開催した。のべ132名が出席している。会議室使用料等に予算を使用した。
- 領域会議:計画班と公募班が一同に会する会議をH29年度に1回開催した。口頭発表30件、ポスター発表54件が行われ、約100名が参加した。会場利用料や会場設営や受付のアルバイト代等に予算を使用した。

(2) 技術的支援(2,353 千円)

- A01 制御工学班:ログボットの開発支援を総括班として行った。試作機検証のために、ロガーやテストボードなどの購入費に予算を使用した。なお、関係する計画班も開発のための予算を負担している。
- 勉強会:工学×生態勉強会、トラジェクトリー・マイニング勉強会、ナビゲーション共同勉強会、画像処理勉強会・相談会を実施した。会場使用料等に予算を使用した。

(3) 融合的研究者育成支援(454 千円)

- 若手横断合宿:H28に第1回(阪大理学部)をH29に第2回(北大セミナーハウス)を実施した。第1回には33名、第2回には56名の参加があった。大型バスの借上げ費や若手研究者への旅費支援等に予算を使用した。

(4) 広報活動(HP、紹介冊子、アウトリーチ)(1,623 千円)

- 領域 HP:HP(<http://navi-science.org/>)を作成・公開した。ホームページの作成・維持費用として予算を使用した。
- ニュースレター:毎年1報のニュースレターを制作し、領域HPにて公開している。No.1とNo.2を公開した。

また、領域事務を円滑に進めるため、本予算で研究支援者1名も雇用している(2,874千円)。いずれも本領域を実施、活性化するために必要な経費であり、予算は効果的に使用されている。

一方、各計画班で購入した、計画班、公募班間の共同研究に使用されている(予定も含む)主要な設備を以下に示す。

・高精細 3D プリンタ	H28	山形大学	¥6,994,890	各種耐水用部品の造形
・正倒立顕微鏡	H28	大阪大学	¥6,836,400	線虫の行動と神経活動の同時計測
・垂直多関節ロボット	H29	東北大学	¥4,698,000	ログボットの評価
・ビジュアルサーボステージシステム	H28	大阪大学	¥4,688,280	線虫行動の自動追跡
・GPU サーバ	H28	大阪大学	¥3,526,200	ナビゲーションデータの分析
・行動実験用防音室	H28	北海道大学	¥3,402,000	コオロギ音源定位行動計測
・神経活動データロガー一式	H28	同志社大学	¥3,278,485	海鳥、魚の脳神経活動計測
・偏光イメージングカメラ	H28	東北大学	¥2,835,000	偏光解析
・データ分析用ワークステーション	H28	名古屋工大	¥2,749,680	ナビゲーションデータの分析

これらの機器は今後も本領域の研究推進のために必須の機器である。このように本領域を推進するために適切に経費が使用されており、予算は効果的に使用されている。

なお、予算を使用していないが、総括班が主体的に実施した領域活動(異分野弟子入り、シンポジウム企画、OS 企画、ワークショップ企画、学会誌特集号企画、サイエンスカフェ、オープン講義等)も多数あることも明記したい。

9. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

合原一幸（東京大学生産技術研究所・教授；複雑系ビッグデータ解析、脳情報システム論）

生物は典型的な複雑系である。したがって、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であった。

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、たいへん重要な研究である。特に、(1)ナビ計測、(2)ナビ分析、(3)ナビ理解、および(4)ナビモデル検証の4つのプロセスから、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、これまでになく新しい視座を切り拓こうとするものである。

実際、これまで2年間の本領域活動において、新しい高機能・高汎用性の「ログボット」を開発し、また先端的な機械学習技術によるナビゲーションデータ解析のためのソフトウェア環境を用途に応じて体系的に確立している。さらに、これらを用いて、野外または実験室内の動物の画期的なデータ取得、および様々な数理モデルによるナビゲーション理解に成功している。中間評価に至るまでの第一段階としては、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、それを活用した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、当初の計画以上に順調に研究が進展したと評価出来る。

本領域は、その生物学的意義のみならず、生物を介した伝染病の拡散防止、害獣の人間圏への侵入防止、自動運転車やロボットの走行制御など、その応用可能性は社会的にもたいへん重要であるため、今後のさらなる研究の発展が強く期待される。

荒井修亮（京都大学フィールド科学教育研究センター・教授；水産学、生態計測学）

本研究はヒトを含めた動物の移動に関して、適切な経路を選択して目的地へ到達するためのナビゲーションを理解することを目的としている。特に環境情報と体内情報を観測する新たな計測機である「ログボット」を開発することで、様々な動物（ウミネコ、オオミズナギドリ、キバナウ、イヌ、ツキノワグマなど）から詳細なデータを得ることに成功した。「ログボット」は従来のデータロガーにおける制約（電池制約・メモリ制約）を巧みな技術的設計によって回避することで、研究者が動物のナビゲーションを理解するためのモデルを構築するための適切なデータを的確に得ることを可能としたことは評価できる。ある意味で従来のバイオリギングの再発明と言えよう。また環境駆動型のログボットも興味深い。我々（海洋生物研究者）も尾びれの振動や水流などを利用したロガーの長寿命化の開発を試みているが現在のところ有効な技術は開発できていない。クジラへの装着とその後のロガーの移動を自律的に行うという発想は環境ハーベストとは異なる発想として興味深い。実海域での実用に供するにはまだ大きなハードルがあるとは思いますが、このような突飛なアイデアは大切に育ててほしい。

従来のバイオリギング・バイオテレメトリーにおいても、メモリの大容量化とデータ取得の高度化（複数の設置型受信機による精密位置計測手法等）によって、取得されるデータが桁違いに増大している。得られた大容量のデータをいかに効率的に解析していくことが、直面している課題である。ヒトを含む様々な動物の行動データに適用可能な機械学習アルゴリズムとソフトウェアの開発は期待される成果であり、何らかの形で我々も使えるツールとして公開が望まれる。

小田洋一（名古屋大学理学研究科・名誉教授；神経生理学、神経科学）

生物が生息のために地球上をどのように移動するかは、「生物ナビゲーション」と呼ばれ、生物の生態を知るうえでもっとも重要な問題の一つである。この問題については長い研究の歴史があるにもかかわらず、これまでは限られた測定手段と解析法しかなく、多くの本質的な問題が不明のままになっていた。

本新学術領域研究では、新しい工学と情報学の手法を駆使し、生態学の未解明の問題にチャレンジし、さらにそれぞれの動物の脳内活動を生理学的に解析して、生物ナビゲーションの研究に新たな展開をめざしている。領域研究の開始以来、工学者が海外のフィールドに行って現場で計測法を改良したり、生態学・生理学の膨大な生データを工学者が新たな視点で解析するなど、異分野の研究者の実質的な連携が見事に達成され、生物ナビゲーションに関して革新的な成果が得られている。

具体的には、生態計測のニーズにあった小型・多機能・長時間記録の性能を持ったロガー「ログボット」の開発と、機械学習を活用した多量データの解析により、フィールドでのさまざまな動物の新しい移動様式が見いだされ、いくつかの海鳥やコウモリの移動に関して、国際的に注目される成果を得ている。さらに、線虫やコオロギなどについて、実験室内のモデルフィールド内での移動行動解析や、移動中の動物の脳ニューロンのカルシウムイメージングなどから、移動とそれを制御するニューロン活動のアルゴリズムに関して極めて興味深い知見が見いだされている。また、本年9月には、海外の第一線で活躍する研究者を招いた国際シンポジウムが予定され、本領域研究の国際的な発展も期待される。

以上のように、本領域研究は異分野研究の融合を戦略として、長年の謎であった生物ナビゲーションの本質に迫る切り口を提示しており、高く評価できる。

10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

ログロボット開発、数理モデル開発を中心として、工学系(A01, A02)と生物系(B01, B02)の融合が進み、互いのフィードバックを通して研究を推進させる枠組を構築できた。平成30年度以降は新しい公募班や領域外の研究者も含めこの共同研究ループを拡げ、真の「新しい学問領域」として確立する。また、これまでに開発した共通の計測技術と分析技術を用いることで、従来は個別の長期的な取り組みによって進展してきた生物学研究を新たな角度から加速させる。

（1）ログロボットの発展

イベント駆動・環境駆動機能のさらなる発展：現ログロボットはイベント駆動機能により、ナビゲーション中に特定のイベント発生に応じて画像、音声などの詳細なデータを記録可能である。イベント検出は、生態学者がラベリングしたセンサデータを用いて機械学習により学習されたモデルにより行っているが、**今後はモデル学習プログラムを公開し、容易にイベント駆動型計測が行えるようなインフラの整備を行う**。また、現ログロボットのもう一方の特徴である環境駆動機能もさらに発展させる。

介入型・プラグイン型ログロボットの作成：ログロボットのこれまでの機能に加え、**介入機能を導入する**。介入機能とは特定の条件が生じたとき、ログロボットが動物になんらかの介入を行う機能である。また、現ログロボットはGPSやカメラなどの多くの動物のロギングに有用なセンサを搭載しているログロボットを開発・提供しているが、対象動物によって必要なセンサは異なるため、センサをフレキシブルに載せ替え可能な**プラグイン型ログロボット**を開発し、適用先の動物種を拡大する。

（2）データ分析技術と数理モデルの発展

データ分析技術・数理モデルの深化：本領域では、これまでナビゲーションの数理モデルを「データ駆動 vs. 知識駆動」、「行動説明型 vs. 機能解明型」という基軸で整理し、発展・拡張を行ってきた(図7参照)。特に、生物学的知識に基づく知識駆動型モデルだけでなく、網羅的計測データに基づくデータ駆動型モデルを動物ナビゲーションのモデル化に利用する試みを重点的に行ってきた結果、データ駆動型モデルで大きな進展があった。今後は、**データ駆動を基軸として知識駆動を統合することで、ナビゲーション行動を適切に説明・予測しつつ新たな機能解明につながる数理モデルの構築を目指す**。

ログロボット連携：ログロボットは、イベント駆動機能、環境駆動機能、介入機能を有するため、能動的にナビゲーションデータを取得できる。イベント駆動機能を利用すると必要ときに必要な情報を取得できるため、**アクティブセンシングに基づく数理モデル構築を行う**。また、環境駆動機能を利用し、環境とのインタラクションのモデル(風や気温などがナビゲーション行動にどのように影響するか)を構築する。さらに、介入機能を利用することでモデルの検証も可能となる。

（3）生態学と神経科学の発展

生態学と神経科学の融合：ログロボットの開発により、**野外動物の移動行動中の神経活動を含んだマルチモーダル計測が可能になって来たこと**、また**機械学習による行動分析から実験室内での動物行動の状態推定が可能になってきたことから**、野外動物行動(生態学)と実験室内動物行動(神経科学)の比較や融合が可能になりつつある。そこで、領域主催の勉強会および関連学会のシンポジウムなどの機会を利用して、両分野の研究者による議論の場を提供し、ナビゲーション移動行動を介した「統一的な動物行動の理解」へ結びつけることを目指す。

データ駆動型行動生物学の確立：従来の生態学や神経科学を計測やデータ分析によって拡張するのでは無く、制御工学やビッグデータの視点から生物学的研究を立案する**データ駆動型行動生物学の検討**を始める。具体的には、生物学者の「勘」に基づかないランダムなデータ採集や実験環境介入を前提とした実験系を用いて、生物系実験の前提となっている「非効率的な試行錯誤」を打破する。神経細胞のランダムな活性化による行動変化解析には先行研究が存在するが(Vogelstein et al. Science 2014; Robie et al., Cell 2017)、「網羅的介入→機械学習分析」という一方通行の解析が行われているに過ぎない。本領域では、「探索的な介入→機械学習分析」の結果に基づいて、次の「介入→分析」実験を計画・実行し、このサイクルを繰り返すことで、格段に効率良く生物学的メカニズムの解明に至ることを目指す。

（4）公募班との連携を深めるための方策

本領域で開発しているログロボットを公募班に貸し出す体制を整備する。一部の大型動物には現状のログロボットをそのま

ま搭載可能であるが、装着技術やデータ入出力などのインタフェースを整備し、特別なノウハウなく利用できるようにする。また、対象動物によって必要なセンサは異なるため、センサをフレキシブルに載せ替え可能なプラグイン型ログボットを開発することで、適用先の動物種を拡大する。また、ナビゲーションデータの共通的・標準的分析のためのソフトウェア整備を進め、生物学分野(B01, B02)の公募研究者が容易に利用できるようにする。データに関しても、本領域では生物学研究者に様々な動物のナビゲーションデータの公開を促している。さらに一部のデータはデータ分析コンペティションのプラットフォームに公開しており、領域内の研究者のみならず、世界中のデータサイエンティストがベンチマークデータとして分析できる体制を整える。

(5) 今年度の公募における「重点的な補充」

以上の推進方策を踏まえ、今年度の公募では以下のように重点的な補充を行う。

A01 における期待する公募研究者像：[1] ログボットの高性能化(小型化、長寿命化、頑健化)に貢献できる技術を有している。[2] ログボットのイベント駆動、環境駆動、介入化、プラグイン化に関連する技術を有している。[3] 網羅的な神経活動計測に関わる新たな光学技術を有している。

A02 における期待する公募研究者像：[1] 統計科学、機械学習、信号処理、画像処理を専門としている(特に、経路データ分析、系列データ分析を専門としていればなおさらよい)。[2] 生物学など異分野との共同研究経験がある。[3] ソフトウェアの公開、コンペティションへの参加の意図がある。

B01 における期待する公募研究者像：[1] 動物の移動行動を研究対象としており、対象動物の対象行動を計測できる環境が整っている。[2] 対象とする生物の数理モデル研究も行っている。[3] データ(発表済のものでよい)を公開する意図がある。

B02 における期待する公募研究者像：[1] 動物の移動行動と神経活動の同時計測を研究対象としており、対象動物の対象行動を計測できる環境が整っている。[2] 対象とする生物の数理モデル研究も行っている。[3] データ(発表済のものでよい)を公開する意図がある。

(6) 国内外の研究者との連携による組織の強化

本領域では、さまざまな学会での企画セッションや新学術領域主催の勉強会を開催し、ナビゲーションに関連する技術を有する制御工学、データ科学研究者、様々な動物の様々な移動行動を研究する生態学、神経科学の研究者との連携を深めてきた。今後も以下のイベントを開催し、連携を深めていく。

国際シンポジウム、ワークショップ開催

2018年07月:米国で開催される情報系の国際会議にて企画セッション開催

2018年09月:本領域主催の国際シンポジウム開催

(予定)2019年:アジア機械学習国際会議にてワークショップ開催

(予定)2020年:情報系の国際会議にて企画セッション開催

(予定)2020年:生態学と神経科学の融合に関する国際シンポジウム開催

国際雑誌での特集号

2018年4月-10月:国際誌(Advanced Robotics)の特集号

(予定)2020年:国際誌の特集号