

領域略称名：階層的生物ナビ学
領域番号：21A401

令和6年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「サイバー・フィジカル空間を融合した
階層的生物ナビゲーション」

領域設定期間

令和3年度～令和7年度

令和6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	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	7

研究領域全体に係る事項

4	研究領域の目的及び概要	11
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	13
6	研究の進展状況及び主な成果	15
7	研究発表の状況	33
8	研究組織の連携体制	38
9	若手研究者の育成に係る取組状況	39
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	40
11	研究費の使用状況・計画	41
12	今後の研究領域の推進方策	42
13	総括班評価者による評価	44

研究組織

(令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

1 総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	21H05293 サイバー・フィジカル空間を融合した 階層的生物ナビゲーション	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・ 教授	9
A01 計	21H05294 多次元バイオロギングによる野生動物 のナビゲーションの多階層的理解	依田 憲	名古屋大学・環境学研究科・ 教授	2
A01 計	21H05295 音響サイバー空間を利用したコウモリ の階層ナビゲーションの理解	飛龍 志津子	同志社大学・生命医科学部・ 教授	6
A01 計	21H05296 場所細胞・格子細胞活動の計測と操作 による階層ナビゲーションの機能解明	高橋 晋	同志社大学・脳科学研究科・ 教授	4
A01 計	21H05297 アリコロニーの全個体識別長時間計測 と組織ダイナミクスの系統的解析	西森 拓	明治大学・研究・知財戦略機 構(中野)・特任教授	3
A02 計	21H05298 χ ログロボット開発とスパースモデリン グによる行動ダイアグラムの解明	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・ 教授	3
A02 計	21H05299 自律的に計測・介入を行う χ ログボッ トのアルゴリズム開発	前川 卓也	大阪大学・大学院情報科学研 究科・准教授	3
A02 計	21H05300 階層ナビゲーションのための数理・学 習ベース解析手法と介入方策決定技術	藤井 慶輔	名古屋大学・情報学研究科・ 准教授	4
A02 計	21H05301 遠隔触覚刺激・二次元通信を用いた行 動介入基盤の開発と行動予測に基づく 動作解析	牧野 泰才	東京大学・大学院新領域創成 科学研究科・准教授	5
A02 計	21H05302 データ駆動型 Swarm-Machine インタ ラクション技術の創出	川嶋 宏彰	兵庫県立大学・情報科学研究 科・教授	3
総括班及び総括班以外の計画研究 計 10 件 (廃止を含む)				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[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 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・教授	研究領域の総括、サイバー技術を中心に計画班・公募班の支援を行う。
分担	依田 憲	名古屋大学・環境学研究科・教授	融合研究において活躍できる研究者の育成、学術的研究推進のための企画、国際活動を支援する。
分担	飛龍 志津子	同志社大学・生命医科学部・教授	遊牧型ポスドクの実現を通して若手研究者育成を担当する。研究企画とニュースレターやアウトリーチ等の広報を行う。
分担	高橋 晋	同志社大学・脳科学研究科・教授	分野融合研究者の育成を担当し、ワークショップや国際シンポジウムなどの企画を行い、若手海外派遣などの国際活動を実施する。
分担	西森 拓	明治大学・研究・知財戦略機構(中野)・特任教授	若手研究者の育成と学会への組織的展開企画を担当する。アウトリーチ等の広報を行う。
分担	前川 卓也	大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授	ログボット活用の技術支援を担当する。国際コンペティション企画、ホームページやアウトリーチ活動などの広報を担当する。
分担	藤井 慶輔	名古屋大学・情報学研究科・准教授	行動解析ソフトウェア技術の支援を行い、共同研究や国際コンペティションの企画を担当する。新しい国際的ネットワーク構築を展開する。
分担	牧野 泰才	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授	ログボットハードウェア技術開発の支援を行う。融合研究者育成とアウトリーチ等の広報を担当する。
分担	川嶋 宏彰	兵庫県立大学・情報科学研究科・教授	システム理論に関連する技術支援を担当する。国際会議等を企画し、国内外研究者交流の活性化を行う。
合計 9 名			

研究項目：A01

研究課題名：多次元バイオリギングによる野生動物のナビゲーションの多階層的理解

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	依田 憲	名古屋大学・環境学研究科・教授	研究統括、野外調査、データ解析
分担	山本 誉士	麻布大学・獣医学部・准教授	野外調査、データ解析
合計 2 名			

研究項目：A01**研究課題名：音響サイバー空間を利用したコウモリの階層ナビゲーションの理解**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	飛龍 志津子	同志社大学・生命医科学部・教授	研究の統括
分担	小林 耕太	同志社大学・生命医科学部・教授	行動実験及び神経生理学的実験の担当
分担	福井 大	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・講師	野外調査及び音響計測の実施
分担	小川 宏人	北海道大学・理学研究院・教授	昆虫の神経行動計測の実施
分担	梶原 将大	北海道大学・人獣共通感染症国際共同研究所・准教授	バイオリギングおよび感染症調査の実施
合計 5 名			

研究項目：A01**研究課題名：場所細胞・格子細胞活動の計測と操作による階層ナビゲーションの機能解明**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	高橋 晋	同志社大学・脳科学研究科・教授	研究の総括、 χ ロボット開発、神経メカニズム解明
分担	牧口 祐也	日本大学・生物資源科学部・准教授	サケ科魚類ナビゲーションの神経メカニズム解明、魚群行動ダイアグラム解明
分担	井出 薫	同志社大学・研究開発推進機構・助教	CPS 構築、マウス行動ダイアグラム解明
分担	檜崎 友子	名城大学・農学部・助教	ウミガメナビゲーションの神経メカニズム解明
合計 4 名			

研究項目：A01**研究課題名：アリコロニーの全個体識別長時間計測と組織ダイナミクスの系統的解析**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	西森 拓	明治大学・研究・知財戦略機構(中野)・特任教授	研究総括
分担	白石 允梓	明治大学・研究・知財戦略機構(中野)・特任准教授	数理モデリング、データ解析、行動実験
分担	古藤 日子	国立研究開発法人産業技術総合研究所・生命工学領域・	行動実験、生理学実験、データ解析

		主任研究員	
合計 3 名			

研究項目 : A02

研究課題名 : χ ログロボット開発とスパースモデリングによる行動ダイアグラムの解明

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	橋本 浩一	東北大学・情報科学研究科・教授	研究総括、スパースモデリング、ログロボット開発
分担	安藤 恵子	東北大学・歯学研究科・准教授	行動実験、ログロボット検証
分担	鏡 慎吾	東北大学・未踏スケールデータアナリティクスセンター・教授	センシングアルゴリズム開発、ログロボット開発
合計 3 名			

研究項目 : A02

研究課題名 : 自律的に計測・介入を行う χ ログロボットのアルゴリズム開発

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	前川 卓也	大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授	研究統括。装着/環境型データロガー製作、アルゴリズム考案・実装、実験
分担	木村 幸太郎	名古屋市立大学・大学院理学研究科・教授	環境型データロガー製作
分担	竹内 孝	京都大学・情報学研究科・講師	動物行動処理アルゴリズム考案・実装
合計 3 名			

研究項目 : A02

研究課題名 : 階層ナビゲーションのための数理・学習ベース解析手法と介入方策決定技術

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	藤井 慶輔	名古屋大学・情報学研究科・准教授	研究総括
分担	田部井 靖生	国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・ユニットリーダー	行動マイニング手法

分担	村上 久	京都工芸繊維大学・情報工学・人間科学系・助教	集団計測と数理モデル
分担	西海 望	大学共同利用機関法人自然科学研究機構(機構直轄研究施設)・生命創成探究センター・特別研究員	動物間相互作用の計測と戦術性の検証
合計 4 名			

研究項目 : A02

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

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	牧野 泰才	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授	研究領域全体の取りまとめ盲導犬訓練の行動計測、介入に関する研究の遂行
分担	高坂 洋史	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授	ショウジョウバエ幼虫の行動介入に関する研究の遂行
分担	増田 祐一	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員	遠隔給電の動物観察への応用についての研究の遂行
分担	藤原 正浩	南山大学・理工学部・講師	超音波フェーズドアレイを利用した遠隔力提示の動物行動介入への応用に関する研究の遂行
分担	野田 聡人	高知工科大学・システム工学群・准教授	無線を利用した動物行動計測、介入に関する研究の遂行
合計 5 名			

研究項目 : A02

研究課題名 : データ駆動型 Swarm-Machine インタラクション技術の創出

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	川嶋 宏彰	兵庫県立大学・情報科学研究科・教授	研究の総括・データ駆動型モデリング
分担	波部 斉	近畿大学・情報学部・教授	魚群行動の計測とデータ分析
分担	新里 高行	筑波大学・システム情報系・助教	魚群行動のモデル化と行動実験
合計 3 名			

3 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	22H05644 閉鎖系に棲む動物の被食回避行動：両生類幼生をモデルとした実験生態学	令和4年度 ～ 令和5年度	岸田 治	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授	1
A01 公	22H05645 小脳活動の光計測と操作による小型魚類の階層ナビゲーションの理解	令和4年度 ～ 令和5年度	津田 佐知子	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
A01 公	22H05648 海を回遊するアカウミガメの多次元感覚による階層ナビゲーションの理解	令和4年度 ～ 令和5年度	坂本 健太郎	東京大学・大気海洋研究所・准教授	1
A01 公	22H05649 CPSにおける個体差を考慮した単独性動物の個体—個体群間の行動階層性の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	小池 伸介	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授	1
A01 公	22H05650 群れ形質の多様化をもたらす個体の行動特性とその神経制御メカニズム	令和4年度 ～ 令和5年度	田中 良弥	名古屋大学・理学研究科・助教	1
A01 公	22H05651 バイモーダルな感覚器官を使い分けるイルカの共同採餌行動	令和4年度 ～ 令和5年度	森阪 匡通	三重大学・生物資源学研究科・教授	1
A01 公	22H05652 日本沿岸に生息する小型鯨類スナメリの移動行動と船舶が与える影響に関する研究	令和4年度 ～ 令和5年度	木村 里子	京都大学・東南アジア地域研究研究所・准教授	1
A01 公	22H05653 野生ウマの重層社会における群内および群間の階層的インタラクション	令和4年度 ～ 令和5年度	山本 真也	京都大学・高等研究院・准教授	1
A01 公	22H05657 環境・身体ダイナミクスの階層的变化に対する昆虫ナビゲーション戦略の解明とモデル化	令和4年度 ～ 令和5年度	志垣 俊介	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教	1
A01 公	22H05663 群れ形成によるホタテガイの集団防衛戦略の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	三好 晃治	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・水産研究本部中央水産試験場・主査	1
A02 公	22H05654 群れの3次元行動計測のための全自動マーカーレスモーションキャプチャ	令和4年度 ～ 令和5年度	延原 章平	京都工芸繊維大学・情報工学人間科学系・教授	1

A02 公	22H05655 数学の群に基づく生物の群行動のデータ解析とメカニズム解明および工学応用	令和4年度 ～ 令和5年度	櫻間 一徳	京都大学・情報学研究科・准教授	1
A02 公	22H05658 ミツバチからひも解く経路積算型ナビゲーションの柔軟性と堅牢性	令和4年度 ～ 令和5年度	佐倉 緑	神戸大学・理学研究科・准教授	1
A02 公	22H05666 非線形階層表現学習による集団ナビゲーション数理構造の解明	令和4年度 ～ 令和5年度	森岡 博史	国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員	1
A02 公	22H05667 生物ナビゲーションにインスパイアされた、ロボットの群衆ナビゲーション	令和4年度 ～ 令和5年度	佐竹 聡	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・インタラクシオン科学研究所・研究員	1
A02 公	22H05646 (廃止) 個体の不均一性がもたらす集団行動の多機能性：集団行動の高次遺伝基盤と制御	令和4年度 ～ 令和5年度	高橋 佑磨	千葉大学・大学院理学研究院・准教授	1
A01 公	24H01454 デジタルツインによって紐解く昆虫の環境適応的な行動選択過程の獲得	令和6年度 ～ 令和7年度	志垣 俊介	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教	1
A01 公	24H01444 動物装着型測器によるペンギンと他の動物の獲物追跡戦術とその誘導方式の解明	令和6年度 ～ 令和7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
A01 公	24H01433 近縁種間において群れを作るか否かのスイッチングを制御する神経機構	令和6年度 ～ 令和7年度	田中 良弥	名古屋大学・理学研究科・助教	1
A01 公	24H01429 大型陸上哺乳類の「渡り」にかかわる階層ナビゲーションのメカニズムの解明	令和6年度 ～ 令和7年度	小池 伸介	東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・教授	1
A01 公	24H01423 小型魚類を用いた群れナビゲーションの階層ダイナミクスについての光解析	令和6年度 ～ 令和7年度	津田 佐知子	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
A01 公	24H01455 ホタテガイの捕食回避機構における成長依存性の解明	令和6年度 ～ 令和7年度	三好 晃治	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・水産研究本部 中央水産試験場・主査	1
A01 公	24H01436 視覚と聴覚の協調によって実現されるイルカの共同採餌行動	令和6年度 ～ 令和7年度	森阪 匡通	三重大学・生物資源学研究科・教授	1

A01 公	24H01442 環境DNAを用いた放流アユの集団ナビゲーションの解明	令和6年度 ～ 令和7年度	宮園 誠二	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授（特命）	1
A01 公	24H01425 磁気コンパス複合体の構造機能解析による地磁気依存的ナビゲーション機構の解明	令和6年度 ～ 令和7年度	金 穂香	東京大学・大学院総合文化研究科・特別研究員	1
A01 公	24H01447 自律移動物体に関わる認知地図の神経機構の理解	令和6年度 ～ 令和7年度	佐藤 直行	公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授	1
A01 公	24H01432 重層社会における集団行動の個体群間・種間比較	令和6年度 ～ 令和7年度	前田 玉青	総合研究大学院大学・統合進化科学研究センター・日本学術振興会特別研究員（PD）	1
A01 公	24H01418 捕食行動に利きを活用するナビゲーションシステムの神経機構	令和6年度 ～ 令和7年度	竹内 勇一	北海道大学・理学研究院・准教授	1
A01 公	24H01419 集団行動の長期追跡を用いたマウスにおける階層的インタラクションの理解	令和6年度 ～ 令和7年度	越智 翔平	東北大学・医学系研究科・助教	1
A01 公	24H01431 アワビの移動と漁業者のアワビ探索を考慮した資源量推定法の開発	令和6年度 ～ 令和7年度	松本 有記雄	東京海洋大学・学術研究院・准教授	1
A02 公	24H01428 鳴禽の社会関係構築から探る生物の社会ナビゲーションとその計算モデリング	令和6年度 ～ 令和7年度	外谷 弦太	東京大学・先端科学技術研究センター・特任助教	1
A02 公	24H01439 Robot-shepherdingの実現に向けた階層型異種エージェント間相互作用メカニズムの解明	令和6年度 ～ 令和7年度	角田 祐輔	兵庫県立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助教	1
A02 公	24H01452 海鳥の移動中の風速計測バイオリギングシステムの開発	令和6年度 ～ 令和7年度	高橋 英俊	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授	1
A02 公	24H01434 多様な生物集団における階層ナビゲーション理解のための機械学習ベースモデリング	令和6年度 ～ 令和7年度	筒井 和詩	東京大学・総合文化研究科・助教	1

A02 公	24H01435 なぜ迷うかを科学する～V R 迷路 移動時における脳波への介入によ る行動の変化～	令和6年度 ～ 令和7年度	船瀬 新王	名古屋工業大学・工学(系) 研究科(研究院)・准教授	1
A02 公	24H01450 慣性センサーを用いた生物個体の 動態解析	令和6年度 ～ 令和7年度	水口 毅	大阪公立大学・大学院理学 研究科・准教授	1
公募研究 計 36 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

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「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、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。

1) 本提案がどのような学術的変革をもたらすか・研究の学術的背景

我々の世界は、ヒトを含む生物と人工物の活動で溢れている。本研究領域では、移動を中心とした個体レベルの活動をナビゲーション（目的地にどのように到達するか）、ナビゲーションの上位にあたる集団活動をインタラクション（Animal-Animal Interaction：個体間相互作用）、そして階層性をもつ両者をまとめて階層ナビゲーションと呼ぶ。階層ナビゲーションはヒトを含む生物行動の本質であり、生物社会と人間社会を支える基本的なしくみである。本提案では、生物の行動に関わる諸問題を解く方法論と技術を根底から変え、既存分野の延長線上からは誕生し得ない「階層的生物ナビ学」と名付けた新しい学問分野を創設することを目的とした研究を行う。

生物の認知・運動システムは、「入力→内部処理→出力」と単純に表現されることが多い。しかしながら、生物の階層ナビゲーションは、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。そこで本提案では、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個体のナビゲーションを、そして個体間相互干渉が集団の複雑な振る舞いを生み出すことを表現する、行動ダイアグラムという概念を考案した。目的によっては、人間活動や人口減による土地利用のような社会変容までを取り込んだ行動ダイアグラムや、個体間インタラクションに限定したダイアグラムも考えられる。各要素は行動（観測可能）や状態（観測不能）のような「変数」と、能力のような「関数」が混在しているため、分析の際は、行動ダイアグラムを数理モデルや機械学習モデルの設計に用いながら各要素とその関係を抽出・明確化し、生物の内外で起こる因果関係を解明する。

行動ダイアグラムの解明のためには、広大で複雑な実世界を効率的かつ戦略的に探索する研究方策が必要となる。本提案では、新学術領域研究「生物ナビゲーションのシステム科学」（以下、前領域）で用いた、ナビゲーションの計測→分析→理解→検証の研究サイクルを進化させ、フィジカル（実世界）とサイバー（データ世界）という構造化した2層を想定したシームレス・サイバーフィジカルシステム（シームレス CPS）を新たな研究方策として用いる。CPSの枠組み自体は、生物分野ではほとんど例が無いものの、工学や情報学、産業や娯楽などの幅広い分野で活用されている。本領域のシームレス CPSは、 α ロボット（後述）を用いてフィジカルとサイバー、そして生物学と情報学を円滑に繋ぎ、フィジカル空間で計測された階層ナビゲーション行動をサイバー空間に取り込み、生物仮説を裏書きした行動ダイアグラムを数理モデルや機械学習モデルとして表現する。そして、環境や内部状態に関する様々なパラメータを変化させて行動のシミュレーションを行い、モデルの曖昧な部分を精緻化したり未観測な行動を誘発したりする計測・介入パラメータを探索して実行に移す。そして、新たな観測を行動ダイアグラムの改善に利用する。

従来型 CPS では、分析や計測、介入立案などが生物学と情報学により分断して行われており、一連のサイクルを回すのに多大な労力と時間を要する上、研究分野の越境に限界があった。一方、本領域で採用するシームレス CPS では、計測→分析→介入方策を立てる→介入（事象の操作）という一連の機能を搭載した独自技術群 χ ログロボット¹（図 4-1）を用いることによって、フィジカルとサイバーの両空間を滑らかに繋ぐ。例えば、前領域では人工知能（AI）を搭載して能動的に計測を行う装着型ログロボットが開発されたが、 χ ログロボットでは AI がより知的に計測・分析・介入を行う。つまり、ログロボットでデータを収集（生物学者が担当）→得られたデータをモデル化（情報学者）→再度モデルを搭載したログロボットでデータ収集（生物学者）という作業工程を、 χ ログロボット上の AI が収集データに基づいて自動的に計測や介入の方策を決定できるよう進化させる。 χ ログロボットには、①生物の新奇行動を誘発し、②行動原理の仮説検証を自動化する機能を実装する。①では、好奇心（Curiosity）に基づき新しい発見に繋がり得る介入・計測方策を決定する。これは新奇性を報酬とする「好奇心」に基づく AI であり、生物の新奇行動を誘発できる。②では、データから推定された因果（Causality）に基づき、介入効果の検証から方策決定までを 1 つのモデルで行う因果強化学習を用いる。これにより、行動ダイアグラムのような生物学者の仮説を検証するための介入方策を効率的に決定できる。①②ともに、様々な行動を誘発するための計測や介入の時間・場所・種類などを自動決定することで、生物学者の発想限界を打破する新しい計測・介入に挑戦するものである。



図4-1 装着型/環境型 χ ログロボットでシームレス CPS を実現

以上のように、本領域では 3 つの革新的なアイデア（行動ダイアグラム・ χ ログロボット・シームレス CPS）を投入し、アリストテレスやダ・ヴィンチらも取り組んだ未解決問題、生き物の階層ナビゲーションの本質に迫る。また、応用的にも、生物の行動予測や効果的な制御方法へ繋がる新たな技術基盤を創出でき、SDGs や COP、環境学、疫学など、周辺分野への貢献は計り知れない。本領域が終了する時期には、様々な融合研究と応用研究を通して、サイバー空間とフィジカル空間を滑らかに連結する新しい学理が完成し、「階層的生物ナビ学」という生物・人間・社会を繋ぐ学問分野が拓かれることが期待できる。

2) 領域設定期間終了後に期待される成果

領域設定期間終了後には、以下の成果が期待される。まず、生物の階層ナビゲーションに関する深い理解が進み、生物や人間社会の相互作用を説明する新たな理論的枠組みが構築される。これにより、「階層的生物ナビ学」という新しい学問分野が創出され、生物の行動を予測し、効果的に制御する技術の開発が進む。また、シームレス CPS を用いた研究方法が確立され、生物学と情報学の融合による新たな研究パラダイムが生まれる。この成果は、SDGs や環境学、疫学などの周辺分野への応用により、社会的な課題解決に寄与する。さらに、この研究領域から生まれる新しい技術や方策は、生物の新奇行動を誘発し、その原理の仮説検証を自動化するなど、科学的探求の新たな道を開く。期間終了時には、サイバー空間とフィジカル空間を滑らかに連結する学理が完成し、生物・人間・社会をつなぐ学問分野として「階層的生物ナビ学」が社会に定着することが期待される。

¹ Chi (カイ) ログロボット: Curiosity/Causality-driven and Highly-Intelligent Log-bot (Logging Robot)

5 審査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) 本研究領域は、豊富な国際的経験を持つ計画研究から構成され、共通プラットフォームの下に領域内での共同研究が綿密に計画されており、インパクトのある学術的成果が期待できる

融合研究の成果を Sci. Adv. や NeurIPS などのトップジャーナルやトップ国際会議に発表したほか、PNAS や Nat. Comm. などに各班の個別研究や国際共同研究を公表した。また、学生を含む領域メンバーが各種受賞するなど、中間評価までに質の高い学術的成果を達成した。さらに、プレスリリースを通じて階層的生物ナビ学の重要性を訴え、80件以上のメディア掲載を果たした。2、4年目には多様な分野から公募研究を採択し、「弟子入り」と「遊牧型ポスドク」の独自システムで異分野融合を加速している。

また、総括班の下で若手研究者育成、国際活動支援、公募研究を含む融合研究など緻密な領域運営体制が構築されており、生物学と情報学を融合した新しい学術コミュニティの創成が期待される

領域代表によるマネジメントの下、毎月の領域運営会議とオンライン勉強会・交流会を開催し、領域の推進、若手育成、共同研究の形成を進めている。これらを通して χ ログロボットや解析手法の提供など、公募研究との新しい共同研究が数多く始まった。国際会議 International Symposium on Hierarchical Bio-Navigation では、生物学と情報学の研究体制を広げるため、Yossi Yovel、David Sumpter、Sara Beery を招聘した。国際会議 (ICMMA2021, BLS8) や国内学会の共催・後援も数多く行った。若手の国際研究活動支援として、北米、ドイツ、中国、ザンビアへの1週間~2カ月に渡る国際派遣を11件実施した。領域終了後も見据えて、英語教科書の執筆(仮題: Animal navigation across scale and hierarchy: Insights from new approaches, Springer Nature)を開始した。コロナ禍で対面イベントは2回に限られたが、今後は対面イベントを増やす予定で、2024年6月の領域会議は対面で実施した。

一方、ヒトに適用する場合の倫理的問題を含め、介入実験の実効性については現時点では解決すべき様々な課題が残されている

介入実験ではヒトと動物の問題が異なる。動物実験は各大学の実験委員会や関連省庁の承認を得て実施されている。また、 χ ログロボットの最終形は、強制的に対象に長時間介入し続けるので、種によっては生命を脅かす可能性があるため緊急停止措置が必要だが、現状そのような実験は想定していない。現在、さまざまな実験動物と野生動物に対して、独創性の高い介入技術の整備を行っているところである。「環境型介入」としては、空気圧で操作する自動変形迷路を開発したが、さらに超音波による非接触介入を組み合わせることで、見える介入・見えない介入を高度に融合した χ ログロボットを構築していく(A01高橋班+A02牧野班)。また、渡り鳥のコンパス細胞研究(A01高橋班+A01依田班, Sci. Adv. 2022)を進展させ、鳥の周辺磁場を制御しながら、脳神経細胞活動を計測する実験を実施した(A01高橋班+A01依田班)。また、再構成可能な迷路とオプトジェネティクスによるドーパミン制御を組み合わせたナビゲーション中のマウスの脳神経機構解明など(Tamatsu et al., iScience, 2023)、先進的な「神経介入」も行った。

本領域では、ヒトの介入実験として、経路誘導や、オンデマンド型交通の導入、スポーツにおける戦術意思決定などを研究している。特に、花火イベント後の群集移動データから移動モデルを構築し、群集移動シミュレーション環境で最適な誘導戦略を強化学習することで混雑と移動時間の最小化を両立した研究(西田ら, JSAI2021; Nishida et al., TRR, 2023)や、人流誘導の介入効果検証や駅商圈推定(竹内ら, JSAI優秀賞 2021; 2022)などにおいて成果を挙げている。実験では能動的な介入を避け、環境に実験機材を置いて計測するだけであり、倫理委員会にも認められている。シミュレーションに関しては、倫理的問題なく介入実験を実施でき、交通シミュレーションでオンデマンド型交通利用者に仮想の停留所まで歩かせることで移動時間と運行コストの最小化ができるかを分析した研究(Nishida et al., IEEE Access, 2022;

AROB, 2021) や、自動運転シミュレーション環境下での人間行動をモデル化した上での介入実験効果検証 (Fujii et al SIGSPATIAL 2022, Best Poster Award) などの研究成果をあげている。オンラインにヒトに介入する研究に関しては、リアルタイム性や様々な協力関係の構築 (例えば介入実験を実施するための避難誘導では、主催者や警察の協力が必要) など、困難な課題が残されている。現在、人流誘導などでも進めているが、介入を「意思決定支援」に置き換えて、例えばスポーツにおける「巧みな運動への意思決定支援」などとしても展開が可能であり、そのプロトタイプとなる反実仮想軌道予測 (Fujii et al., IEEE TNNLS, 2024) や強化学習に基づく行動評価 (Nakahara et al., IEEE Access, 2023) を行った。

また、学術変革の名に値する領域を構築するためには提案された強力な方法論を基にした「階層的生物ナビ学」の学理の構築も必要である

本領域では、個体群や単独個体の移動から細胞内物質輸送まで、生物ナビゲーションが本質的構成要素と要素間の因果関係、そして階層性で表現できると考え、「行動ダイアグラム」の概念を考案した。我々は、この行動ダイアグラムの考え方を基本に据え、計測データから行動ダイアグラムの構築に至るまでの基礎方法論の整備までを含めて「階層的生物ナビ学」の学理構築であると位置付けている。方法論の中心となるのが、 χ ログボットを用いたシームレス CPS であり、これを実現するために、介入、計測、分析、介入方策立案の基礎理論と技術の開発を進めている。初期段階として、これらの要素を組み合わせることで、シームレス CPS のモデルケースをいくつか提示する。その後、それらの背景にある理論を統合してフレームワーク化することで、あらゆる種の行動ダイアグラムを構築するのに用いられる見通しの良い基礎方法論を整備する。以下、それぞれの要素に関して、特に進捗のあった取り組みについて報告する。**介入** ラボ環境において、超音波フェーズドアレイを用いて昆虫の行動に介入する環境型 χ ログボットを実現した。ショウジョウバエ幼虫やアリの行動抑制、トンボの採餌行動に対する餌の 3 次元制御などに応用し実験を行っている (A02 牧野班+A01 西森班+A02 藤井班、JSME ROBOMECH 表彰 (学術研究分野))。野生環境においては、介入装置 (スピーカ) を備えた装着型 χ ログボットを開発し、リアルタイムで認識された行動 (例: 飛行行動) をトリガとした介入実験を行っている (A02 前川班+A01 依田班)。また、ウミガメなどの回遊動物への行動介入のための、局所的な磁場変化を生じさせる装着型 χ ログボットの設計を行い試作している (A02 牧野班+A01 高橋班+公募・坂本班)。**計測** 集団の移動を高精度にトラッキングするための先端技術開発を進めている。コンピュータビジョンによる 3 次元の姿勢推定などの技術 (公募・延原班) や微細 RFID タグおよび微細 QR コードによる行動計測系の構築 (A01 西森班) 等がトラッキング技術の代表例として挙げられる。また、野生環境における装着型 χ ログボットのための選択的行動計測を実現する、好奇心搭載 χ ログボットを新潟県の海鳥で運用している (A02 前川班+A01 依田班)。海鳥に装着する χ ログボットについて、帰巢時に遠隔給電する巣箱型デバイスの開発も進めている (A02 牧野班+公募・坂本班, JSME 若手優秀講演フェロー賞)。**分析** 得られた計測データから行動ダイアグラムを構築する試みとして、集団行動を記述する行動ダイアグラムのモデル化に関する取り組みを行っている。数理モデルを用いた取り組みとして、コウモリの集団飛行時に見られる混信回避行動の数理モデル化 (Hiryu, Nishimori, Yoda et al., 聴覚研究会, 日本音響学会大会発表) や、アリコロニーを人工的に分割した場合に個体毎に労働頻度を切り替える「労働補償性」の数理モデル化 (Nishimori et al., SWARM2021) を進めている。また、数理モデルと機械学習モデルを融合した試みとして、多種の生物集団移動データから相互作用の規則を抽出できる方法を開発した (Fujii et al., NeurIPS, 2021)。**介入方策立案** 介入方策の効果を検証するための、自動運転シミュレーションを用いた因果推論手法を開発した (Fujii et al., SIGSPATIAL, 2022, Best Poster Award)。また、野生環境における装着型 χ ログボットのためのルールベースの介入手法を開発し、青森県の海鳥で運用している (A02 前川班+A01 依田班)。今後は効果的な介入方策を自動で立案する方法を開発する。

6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する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。)

研究項目 A01 依田班「多次元バイオリギングによる野生動物のナビゲーションの多階層的理解」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

複雑に変化する自然環境下で、野生動物はどのように外的・内的情報を抽出・処理して階層ナビゲーションを行うのか？本計画研究では、この学術的問いに対し、野生動物の中でも特に機動力に優れた大型の鳥類と哺乳類を対象として、行動や情報処理のコストや、行動による利益を実測し、階層ナビゲーションを支える行動ダイアグラムを解明する。この目標に向け、A02 サイバー班と共同で、環境・生理・行動パラメータを野外で計測する装着型 χ ログロボットを開発する。 χ ログロボットだけでなく、多次元バイオリギングやドローンも利用して野外調査を行い、データ取得後は環境・生理・行動情報の統合的解析を行う。これらのデータを行動ダイアグラムに基づきモデリングすることで、外的環境から感覚生理を経て行動に至る基本的な挙動を理解し、渡り・回遊や集会的意思決定などの階層ナビゲーションを支える機構と適応を明らかにする。

中間評価実施時までには、(A) 最先端のバイオリギングデバイスの開発とフィールドでの稼働、及び(B) 得られたデータに対する先端的な解析を当初目標としていた。特に、ミクロスケールで働くメカニズムがマクロスケールで表れる移動経路にどのように影響するか、モデル化することを目的とした。(2-1)で述べるように、融合研究だけでなく、個別研究に関しても多数のトップジャーナル論文を公表しており、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究(公募班との共同研究は2-2)

以下のように、他の計画班との融合研究を多数進め、原著論文として発表した。

(A) A02 前川班およびA02 橋本班と共同で、装着型 χ ログロボットを開発した。新潟県や青森県で繁殖するオオミズナギドリやウミネコに行動に介入する χ ログロボット(論文準備中)を装着した。

特に、外れ値検知技術を搭載した χ ログロボットは、動物行動学分野で注目された(Tanigaki et al. PNAS Nexus, 2024)。動物行動学では、観察の難しい発生頻度の低い行動を撮影したいというニーズがあった。動物の行動は加速度で記録できるため、加速度パタンの外れ値を検知すれば、稀な行動を撮影できる。この発想を用いて、オオミズナギドリの新しい行動、例えば飛翔開始直後に首を振る行動を撮影し、その意義を検討することができた。本手法は、生態学のニーズと情報学のシーズが一致した例でもある。

A01 高橋班と共同で、神経活動ロガーを利用し、オオミズナギドリの脳内の内側外套から頭方位細胞の存在を確認した(Takahashi et al. Sci. Adv., 2022)。これは、生態学的知見に基づく神経科学的仮説を

生物とナビゲーションの階層性

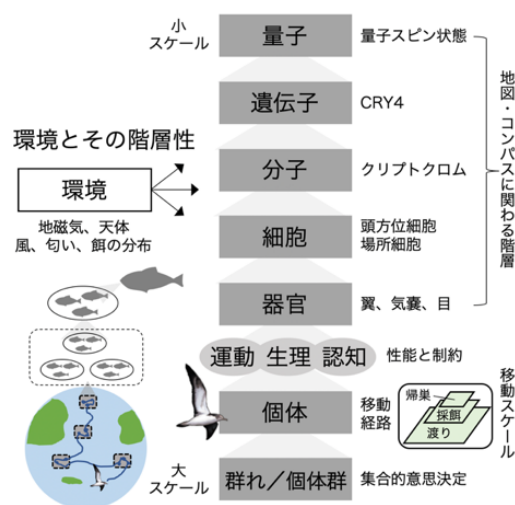


図6. 1-1 動物行動と環境の階層性を整理

し、融合研究を推進することによって、ミクロのメカニズムから、マクロの移動の理解まで行った

検証したものである。新潟県のオオミズナギドリの幼鳥が本州上空を真南に飛翔したことから、「コンパス」は脳内に存在するが、地図は持っていないことが示唆されていた (Yoda et al. *Current Biology*, 2017)。そこで、神経活動ロガーを用いて、脳内に実装されている「コンパス」の実体探索を行った結果、頭方位細胞が発見された。この本共同研究は、生態仮説駆動型の神経科学実験として、多階層を融合した新たなアプローチを確立した研究である。

A01 飛龍班とは、沖縄のオオコウモリに対するバイオリギングを行い、採餌移動経路の記録から季節や成熟度による夜間移動の違いを分析した。また、キクガシラコウモリのルート選択に関する知見を纏めた論文を投稿中である (Fujioka et al., under review, 2024/05/11 現在)。

(B) **A02 前川班**とはウミネコの加速度情報の解析を行い、深層学習を用いた行動認識手法の評価を行った。野生動物に加速度ロガーが装着されて以来 (Yoda et al., 1999)、加速度時系列データを用いた行動分類は様々な方法で行われてきた。特に近年は機械学習を用いた手法が採用され始めているが、深層学習モデルの効率的な学習手法の検討については行われていなかったため、様々な手法や教師なし事前学習の検討などを行った (Otsuka et al., *Methods in Ecol Evol*, 2024)。

A02 藤井班とは、生態学分野において「移動生態学」を提唱した Nathan らの概念モデル (Nathan et al., *PNAS*, 2008) を明示的にモデル化し、実データから相互作用のルールを学習するモデルを開発した (Fujii et al., *NeurIPS*, 2021)。依田班からは海鳥のカツオドリのデータを提供し、複数羽のカツオドリが群れで飛翔する際に、個体間でどのように接近・回避しているかを推定することに成功した。

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

個別研究については、以下のように、トップジャーナルの *PNAS* や *Nat Comm* など、以下のような世界的な成果を発表した。Goto et al. *PNAS* (2024) では、人間が作り出す移動経路 (ヨットレースの経路) と、ワタリアホウドリの移動経路のデータを取り扱い、ミクロスケールに働く力学的共通性がマクロ (500 km) スケールの移動経路の類似形を生み出すことを示した。まず、アホウドリとヨットの移動経路の多様性と類似性 (直線的にゴールに向かうこともあれば、大きくジグザグに進みながらゴールに向かうこともある) を指摘した。次に、GPS データを解析し、風に対してどちらに向かえばどの程度の速さで飛べるかという、風に対する速度性能が類似していることを示した。さらに、この速度性能の類似性が、マクロスケールの移動経路の類似性を生み出すことを示した。言い換えると、ヨットもアホウドリも、ゴールへ到着する時間を最小化していることが示された。本研究は、ミクロの力学制約がマクロの移動に影響を与えること、異なる階層間をつなぐ解析やモデリングを行う必要があることを示唆している (図 6.1-1)。

Lempidakis et al. *PNAS* (2022) では、台風に向かって飛ぶ海鳥の発見を報告した。台風に対する野生動物の対応は昔から興味を持たれていたが、実際のデータを得るのが難しく、よくわかっていなかった。そこで本研究では、前領域 (新学術領域) から継続して毎年蓄積した行動ビッグデータを利用して、台風に遭遇した海鳥の GPS 経路を抽出し、解析した。Goto et al. *PNAS Nexus* (2022) では、飛翔生物のグライディング行動について、数理モデルを構築した。さらに、野外調査で得られたデータは、基礎科学だけでなく、生態保全のためにも有用で、例えば海洋プラスチックと海鳥の分布の関係を世界中の研究者と共同して発表した (Clark et al., *Nat Comm*, 2023)。Goto & Yoda *J Physical Soc Jpn* (日本物理学会 2023) では生物ナビゲーションの階層性を数理モデルとして具体化する重要性を総説としてまとめた。

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

公募・木村班と、ドローンを用いて伊勢湾・三河湾のスナメリの体長を測定する手法を開発した。依田班の4年生を共同で研究指導することによって、実質的な共同研究を進めることができた。また、**公募・森阪班**とは、御蔵島のイルカの移動を3次元的に追跡する手法を開発する博士課程学生を共同で指導している。

研究項目 A01 飛龍班「音響サイバー空間を利用したコウモリの階層ナビゲーションの理解」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

本研究は、ナビゲーション研究におけるコウモリのモデル動物としての利点を活かし、モノや環境などとのインタラクションを含む個体レベルのナビゲーションから、より複雑な集団レベルに至る様々な階層のナビゲーションを工学から生態学に至る幅広い手法を用いて高度に計測し、動物の意思をデザインする「行動ダイアグラム」を明らかにすることを目的としている。音響数値解析的にコウモリの知覚空間を再現できることに着想した音響サイバー空間を構築し、フィジカル空間での行動実験と連動させることで、コウモリの階層ナビゲーションの包括的理解からその社会応用までを目指す。

中間評価実施時までには、コウモリの個体レベルの音響ナビゲーションに関する新たな行動学的発見や集団レベルの音響ナビゲーションの数理モデル化とその工学的応用を当初目標としていた。(2-1)で述べるように、融合研究だけでなく、個別研究に関しても音響サイバー空間とフィジカル空間の融合により、コウモリの音響ナビゲーションによる知覚空間の可視化やエコーロケーションに関する新たな行動学的発見、またバイオリギング調査によって野生コウモリの移動パターンに関する萌芽的な研究成果が得られ、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は 2-2）

コウモリの個体レベルの音響ナビゲーション：A02 藤井班と共同で、障害物回避を行うコウモリの飛行経路に関して、模倣学習を用いた予測モデルを開発した。飛行生態が異なる2種のコウモリに対して、事前に学習していない未知の障害物環境においても飛行経路を予測するモデルの構築に成功した（図 6.2-1：源田，手嶋他，計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2023 最優秀発表賞／2nd BiRD2023 in IEEE PerCom2023 Best Presentation Award／

2023 年度同志社総長賞）。さらに藤井班と共同で、コウモリが動く物体（獲物）のトラッキングタスクをエコーロケーションと飛行を調和させて巧みに達成していることを発見し、それを支える包括的な行動制御ルールを提起した（図 6.2-

2：西海他，日本動物行動学会大会／Nishiumi, et al., Current Biology, 2024）。

図 6.2-2 動く獲物に対するコウモリの音響ナビゲーション。(左)計測システム。(右)結果の概念図。エコーロケーションと飛行の調和により定位誤差を補正している

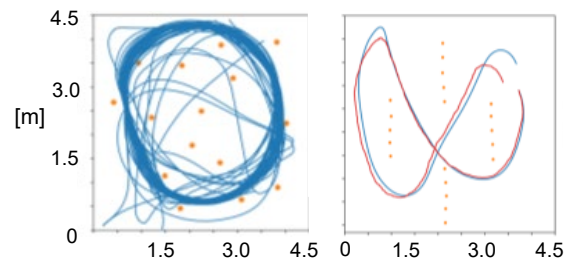
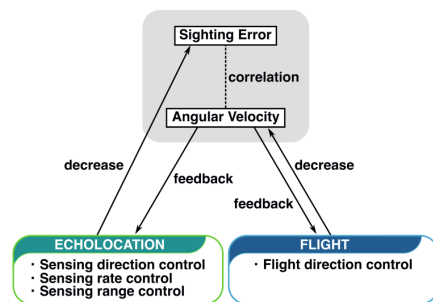
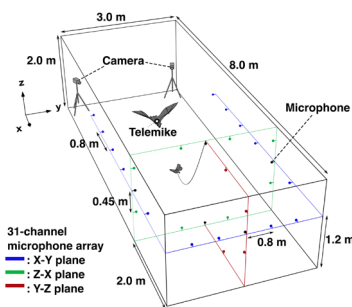


図 6.2-1 模倣学習によるコウモリの飛行経路予測の例。(左)学習データ。(右)未学習の障害物レイアウトにおけるコウモリの飛行軌跡(青)と予測結果(赤)



またヒトに致死的な出血熱を引き起こすウイルスの宿主である

アフリカ産オオコウモリの移動パターンの解明のため、分担者梶原を中心に A02 前川班、A02 依田班、A02 橋本班と連携し、ザンビアでのバイオリギング調査を立ち上げることに成功した (Kajiwara et al., The 8th International Bio-Logging Science Symposium)。

コウモリの集団レベルのナビゲーション：コウモリが同種他個体と同時に飛行する際に見せる周波数調整行動に関して、A01 西森班と共同で数理モデルを用いた分析を行い、その行動機序を明らかにすることができた (Hase, Nishimori, Hiryu et al., 19th International Bat Research Conference／投稿準備中)。また

世界的にも観測例が少ない同所性の複数種コウモリの集団出巢行動に関して、A02 川嶋班と共同で映像によるトラッキングと音響分析を行い、野生下での周波数調整行動に関する新たな知見を得ることができた（杉森他、日本哺乳類学会 2023 年度大会／投稿準備中）。

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

飛行中のコウモリが聴取しているエコーの取得は技術的に困難であることから、エコーロケーションによってどのような空間を把握しているのか、推測する手段がなかった。そこでフィジカル空間で取得したコウモリの行動データとサイバー空間での音響シミュレーションを組み合わせることで、コウモリに届くエコーを復元することで、エコーから定位される障害物空間の可視化に、コウモリが音によって構築される空間は、我々が視覚による実際の認識空間とは異なることを発見した（Teshima, Hiryu et al., BMC Biology, 2022）。

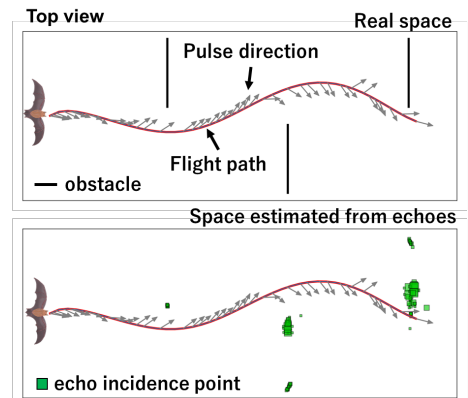
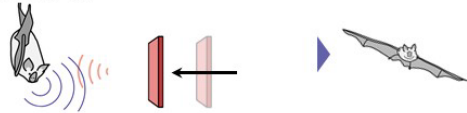


図 6.2-3 コウモリのエコー空間。(上) フィジカル空間で計測したコウモリの飛行軌跡と超音波の放射方向。(下) 音響シミュレーションにより再構成したエコー空間。

コウモリのエコーロケーションに関して、捕食者などの脅威を回避するために重要となる“物体の動き”の検知は何を手掛かりに行なっているかは明らかでなかった。そこで接近する物体から

A 接近物体の呈示



B 音響的な仮想物体の呈示

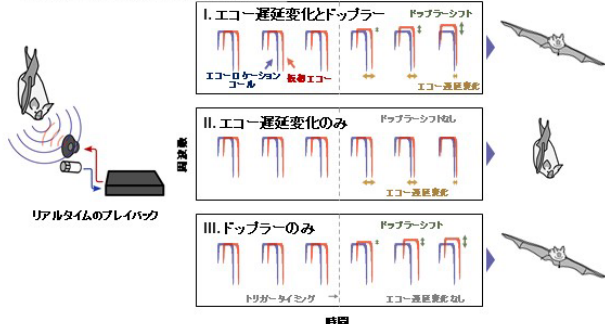


図 6.2-4 エコー介入によるコウモリのエコーロケーション戦術の解明。(上) 接近物体を知覚すると逃避する(下) 物体の動きはドップラのみを手がかりにしている

のエコーを人工的に作成し、コウモリに聞かせたところ、従来考えられてきた物体の接近に伴うエコーの遅延時間の変化ではなく、動きによって生じるドップラースhiftを用いていること、またそれにより接近物体の検知が 30 ms と極めて速いことを発見した（Yoshida, Hiryu et al., iScience, 2024）。

分担者の福井と連携し、日本最大のエコーロケーションコウモリ種のヤマコウモリに対して、独自に開発した超小型音響 GPS ロガーを搭載し、夜間の採餌飛行の記録に始めて成功した（図 6.2-5 : Niga, Fujioka, Hiryu et al., Royal Society Open Science, 2023）

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

コウモリで開発した小型超音波録音デバイスをもとに、公募・小池班が実施する野生のクマのコミュニケーション音声録音の検討を、また公募・津田班とも生物の発する音声録音に関して連携を始めている。また分担者の小川と公募・佐倉班が共同し、コオロギを題材として VR 環境を実現するトレッドミルデバイスを開発し、環境とのインタラクションが偏光コンパスナビゲーションに与える影響についての解析を行い、コオロギが偏光に対する指向性を柔軟に変化させ、より好ましい環境へ移動することを明らかにした（Matsubara, et al, 日本生理学会, 2023）。



図 6.2-5 独自開発の超小型音響 GPS ロガー

研究項目 A01 高橋班「場所細胞・格子細胞活動の計測と操作による階層ナビゲーションの機能解明」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

脳内にある空間認知細胞群の活動を手がかりとし、階層ナビゲーションを認知神経科学的に理解することを領域設定期間内の目標としている。その目標を達成するため、(A)神経活動計測・操作が可能なモデル動物であるラット・マウスの利点を活かし、外的要因だけではなく内的状態をも踏まえ、行動ダイアグラムの要素を詳細に同定する。(B)領域内で共同し、環境型・装着型 χ ログボットを開発し、活用する。また、(C)渡り鳥やサケ科魚類といった野生動物をも対象とすることで、自然環境下での階層ナビゲーションに関する神経メカニズムを解明する。これらの成果を総合することで、階層ナビゲーションの包括的な理解を目指す。

中間評価実施時までには、(A) 神経活動計測・操作をし、ナビゲーションに関与する行動を操作する実験系を確立すること、(B) サイバー班と共同した分野横断的な研究体制で、環境型・装着型 χ ログボットのプロトタイプを開発し、動物実験において実用性を検証すること、(C)フィジカル班内の分野横断的な研究体制で、介入操作をしながら渡り鳥やサケ科魚類の脳内神経細胞活動とナビゲーションの因果関係を明らかにする実験系を確立することを当初目標とした。(2-1)で述べるように、融合研究だけでなく、個別研究に関しても、これらの目標を達成する研究成果が得られたため、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果と進展状況

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は 2-2）

目標(A) : A02 藤井班らと共同し、動物の個体間相互作用の規則を学習するため、拡張行動モデルを開発し、それを活用することで、同一ケージ内で育ったマウスと異なるケージで育ったマウスの相互作用を移動軌跡から推定することに成功した (Fujii, et al., NeurIPS, 2021)。この研究をさらに進展させ、移動軌跡から推定した多個体相互作用が、単一個体の脳内情報表現にどのように影響しているのかを理解するため、動物が現在居る位置を表現する海馬の場所細胞活動をマウスから計測し、その活動と多個体相互作用との関連性を解析している。その途中経過として、マウス間の相互作用に関連し、場所細胞が表現する場所情報の変化が観察された (畦地ら, 日本神経科学学会, 2022)。

目標(B) : A02 牧野班と共同し、従来困難であった自然環境での地磁気操作を可能にする装着型 χ ログボットを開発した。そして、その地磁気介入装着型 χ ログボットを、地磁気コンパスを活用して回遊するとされるサケ科魚類のマスに装着する予備実験を実施し、介入効果を移動や頭部方向性から検証した(図 6.3-1)。



図6.3-1. 地磁気介入装着型 χ ログボットを装着し遊泳するマス

目標(C) : A01 依田班と共同し、渡り鳥の脳内にある内側外套から頭方位を表現する神経細胞—頭方位細胞—を発見した。モデル動物のマウスなどが有する頭方位細胞は、全方位を一様に表現するが、我々が発見した渡り鳥の頭方位細胞群は、右図に示すように、集団としてはあたかも地磁気コンパスのように北方位を好んで反応することを示した(Takahashi, et al., Sci. Adv., 2022)。この成果を起点とし、上記した地磁気介入装着型 χ ログボットの開発や、下記(2-1-2)に記載する地磁気介入環境型 χ ログボットの開発といった公募研究をも含む領域内融合研究が生まれ、頭方位細胞と地磁気との因果関係の検証が進展している (公募研究との融合内容に関しては、(2-2)に記載)。

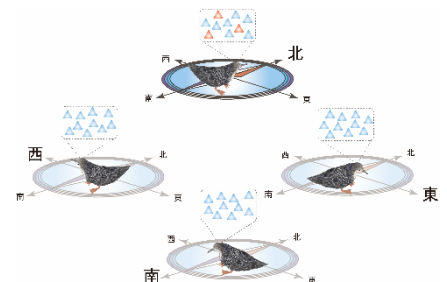


図6.3-2 渡り鳥の頭方位細胞は、北方位を好む

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

個別研究についても、以下のような研究成果を挙げた。

目標(A): ナビゲーションに深く関与する海馬において、腹側被蓋野ドーパミン作動性ニューロンの軸索から放出されるドーパミンを光遺伝学的に介入操作することで、ドーパミンの一過的な放出がナビゲーション目標の迅速な変更に参加することを示した(Tamatsu et al., *iScience*, 2023) (図 6.3-3)。A02 前川班と共同し、この実験システムに、動物姿勢のリアルタイムトラッキングを組み込むことに成功した。更に、動物が稀にとるナビゲーション行動を惹起するように、海馬内のドーパミン放出を促す深層強化学習法を開発している。今後は、これらの機能を統合することで、シームレス CPS を構成し、階層ナビゲーションを解明していく。

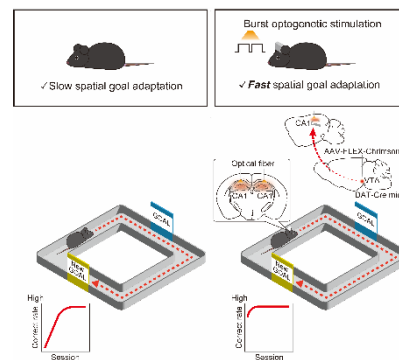


図6.3-3 右のように海馬内のVTAドーパミン軸索を刺激するとナビゲーションゴールを迅速に変更することができる

目標(B): 空気圧で昇降できる柱を組み合わせることで、自動的かつ動的に変形できる迷路システム (図 6.3-4) を構築した。そして、本計画研究が主導的に開発している神経ロガーや再構成可能な迷路に関し、操作方法を含む包括的な解説論文を報告し、今後の展開について議論した(Sawatani et al., *JoVE*, 2022; Ide & Takahashi, *Micromachines*, 2022)。現在、この自動変形迷路と、A02 牧野班が有する超音波による非接触介入を組み合わせることで、「見える介入」と「見えない介入」を高度に融合した環境介入型 χ ログボットを構築している。また、ヘルムホルツコイル内の地磁気を制御し、その中で脳神経細胞活動を計測できる環境介入型 χ ログボットを開発し、渡り鳥に対して、越冬地の地磁気に転送させる実験を実施した。



図6.3-4 開発した自動変形迷路でN型通路を形成

加えて、多個体相互作用を理解するには、画像から多数の動物個体を同時に追跡する必要があるが、個体が群れたり、重なり合ったりし、追跡が困難になる問題があった。物理マーカーは、動物の自然な動きを阻害するなどの問題点があったため、バーチャルなマーカーをつける手法を考案し、多個体の姿勢を高精度に推定する手法を開発した(Azechi & Takahashi, *bioRxiv*, 2023)。

目標(C): (2-1-1)で言及した本計画研究において、渡り鳥の脳内から発見

したコンパスのような頭方位細胞と、イスラエルの研究グループが発見したウズラの頭方位細胞、北米の研究グループが発見したシジュウカラの場所細胞を俯瞰し、哺乳類や鳥類が進化的に獲得した空間認知細胞は、動物固有の生態的な要求がもとになり形成されるという独自仮説を提唱し(Takahashi et al., *Advances in Neurobiology*, Springer, 2024)、今後の研究の道筋を示した。

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果と進展状況

公募・三好班と共同し、群れる集団行動と移動の関連性について研究を実施した。分担の牧口がもつ移動追跡法を活用することで、自由遊泳によって捕食者を回避しながら単独で生活するホタテ貝を対象とし、捕食者の存在が群れ構造に与える変化を明らかにし、ホタテ貝は群れて身を守ることが示唆された(三好ら, *日本動物行動学会*, 2023)。この共同成果は現在、投稿論文を準備中である。

公募・坂本班と共同し、A02 牧野班が開発した地磁気介入装着型 χ ログボットを、地磁気コンパスを活用して回遊するとされるウミガメの頭部に装着し、遊泳行動と磁気変化の関係性を示唆する予備的な知見を得た(Sakamoto et al., *International Symposium on Hierarchical Bio-Navigation*, 2024)。この手法は、(2-1-1)で言及したように、サケ科魚類のマスやサケにも装着しており、動物種間の違いを検証する領域内分野横断的研究に進展している。

研究項目 A01 西森班「アリコロニーの全個体識別長時間計測と組織ダイナミクスの系統的解析」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

アリは、特定のリーダーがいなくても関わらず、高度な分業行動、協調行動を通して高い生産性を維持し数千万年にわたって繁栄してきた。本研究では、世界最小レベルの RFID タグを利用してコロニー内の全てのアリの行動を個体識別し自動計測するシステムを導入する。これによって、従来の国内外の研究と比較して圧倒的な質と量の「行動ビッグデータ」を収集・解析し、集団における労働分配・労働再編のダイナミクスを捉え、アリにとどまらない組織動態の新しい概念形成を目指す。とくに個体数急減や要避難状況などの「介入」に柔軟に対応する「労働補償性」や「労働協働性」をシームレス CPS の手法を活用した介入実験をとおして検証する。中間評価実施時までには、上記目的に合った適切な介入操作を導入し、本グループの自動計測系の機能を拡張し、より広い範囲での行動データを収集と理論モデルや生理学的解析を組み合わせることで、アリコロニー内の役割分化や協調性のダイナミクスを捉えこと、および、アリにとどまらない組織動態の新しい概念形成への端緒をつかむことを目標していた。

(2-1)で述べるように、融合研究を通じて、RFID タグを使用した計測系の改良が進み、また、超音波照射技術を運用した全く新しい形での介入操作が実現した。さらに、個別研究では、個体数に依存したアリの行動変容・生存日数変容というユニークな成果が出版されるなど、当初の計画以上に研究が進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果と進展状況

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は 2-2）

A02 牧野班との融合研究として、超小型 RFID タグを利用したアリの個体識別行動計測システムの改良が挙げられる。当行動計測システムにおいて最大の課題は、巣内の複数の小部屋を結ぶ隘路内に設置されたセンサーゲートにおける RFID タグの感度向上である。RFID タグの微小さのため、従来は RFID タグとセンサー間距離が 2mm 程度以上になると測定に困難が生じたが、A02 牧野班の野田は、RFID タグ・センサー系の感度の精密計測と改良を進め（野田,電子情報通信学会 SRW 研 2023）、新型タグを採用することで最大 1cm ほどの範囲まで測定可能な試作系を作成した。これによって小部屋間に設置されたゲートの通過時間のみの計測に加えて小部屋内での行動計測可能となる計測系の雛形ができた。

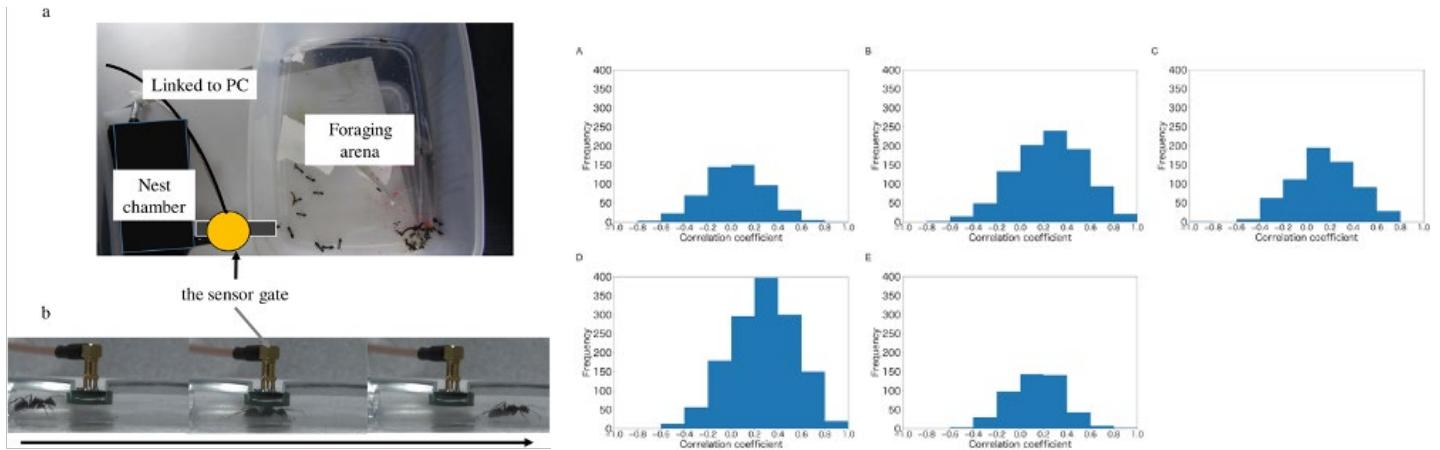
同じく A02 牧野班との融合研究として、運搬されている餌に超音波を照射してその実効的な重量を変化させ、アリの挙動がどのように変化するかを観察する新しい介入方法を実現した。これによって、餌の実効的重量と運搬速度の非線形関係、および、実効的重量の履歴に応じた運搬速度の変化も見出した。また、実効的重量の変化に伴うアリの歩容の変化も見出した。ピンセットなどの物体を用いて餌の運搬行動にリアルタイムで介入することは、視覚・嗅覚刺激に敏感なアリの実験では困難をとまうが、牧野らが開発した超音波装置によって視覚・嗅覚には影響を与えずに時間・空間的に解像度の高い介入操作が可能となったことは特筆すべき点である。これらの成果は、第 68 回日本応用動物昆虫学会大会等で発表された（久本, 2024）。

A01 飛龍班との融合研究として、コウモリの超音波を相互コミュニケーションの手段として集団飛行する際の行動のモデリングに参画した。具体的には飛龍班と共同で、個体間の周波数調整行動による集団飛行の数理モデルを構築して、コウモリの軌道データの解析を行い、その行動機序の解明を試みた（19th International Bat Research Conference／投稿準備中）。

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

1. アリの労働分配・労働再編のダイナミクスを「行動ビッグデータ」から捉える目的に関して、微細 RFID タグをコロニー内の全個体に装着し長時間行動時系列を取得する独自の計測システムを用いている。これまで、巣と採餌アリーナをつなぐゲート通過回数(=採餌活動量と定義)の時系列データに注目

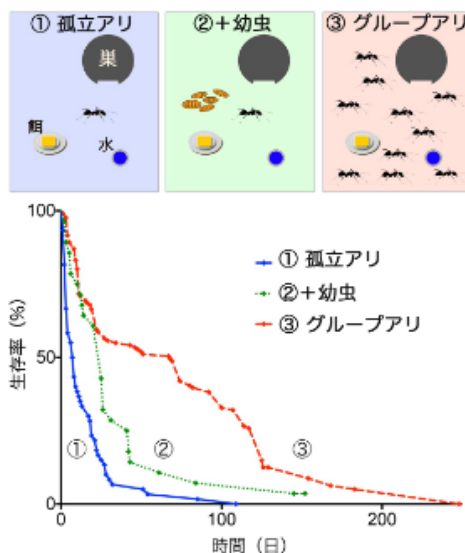
し、まず、その定常性を確認し、各個体についての採餌活動量は対数正規分布で表現し得ることを明らかにした。その後、コロニー全体として日毎の採餌活動量についても定常性を確認し、活動量分布として対数正規分布を得た。「独立に振る舞う各要素の振る舞い」の統計分布と、「全体としての振る舞いの総計」の統計分布がともに同種の分布を示す場合、該当する分布は安定分布の必要条件を満たす。一方で対数正規分布は安定分布ではない。ここからの理論的帰結は、我々が扱ったアリのコロニーにおいて異なる個体間の採餌行動に相関があるということである。実験における測定精度の有限性も考慮し、我々は、連続する2日間の活動量変化の個体間相関の分布も解析し正の相関の傾向を得た。これらの結果は、大量の時系列データの解析と理論的考察のみから個体間の行動相関の存在を検証した新しい手法の研究成果として Plos one (Goko et al. 2023) に掲載された。



2. アリの集団への介入

実験として、単独もしくは少数のアリを長期間飼育することで、飼育個体数に依存した活動度や生存期間の変化の特徴付けを行った。さらに、生理学的な解析によりその理由づけを行った。結果として、単独で飼育されたアリは、10匹で飼育されたアリに比べて有意に活動度が上昇し、かつ生存日数が短縮することが明らかになった。その際、体内での脂肪組織で高い酸化ストレスがみられること、抗酸化剤の付与で生存日数の短縮が和らげられることも明らかになった。これらは Nature Communications (Koto et al. 2023) に掲載された。本研究成果は国内 25 社の新聞（毎日新聞、朝日新聞等）や、Yahoo! ニュースをはじめとする web 記事(計 22 件)に掲載されるなど、一般社会においても高い関心を集めている。

図 6.4-1 [Goko, Yamanaka, Shiraiishi, Nishimori, 2023]の概要図。左図: 餌場と巣を結ぶセンサーゲートを通るアリの様子。右図: 連続する2日間の採餌活動量変化に関する、5つのコロニーでの個体間相関係数の分布。5個のコロニーのうち、4つのコロニーで正の相関の傾向を得た



(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

現時点では公募研究との連携の具体的成果は出ていないが、微細 RFID タグや微細 QR コードを使用した個体識別自動計測技術について、公募・津田班が進めるゼブラフィッシュの行動計測への適

図 6.4-2 [Koto et al. 2023]の概要図。孤立したアリ(図中の上側左ボックスと青色の生存曲線)、幼虫を伴い孤立したアリ(上側中ボックスと緑色の生存曲線)、グループで飼育したアリ(図中の上側右ボックスと赤色の生存曲線)における、生存率の時間(日数)推移

用可能性について話を進めている段階である。

研究項目 A02 橋本班「 χ ログロボット開発とスパースモデリングによる行動ダイアグラムの解明」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

階層ナビゲーションを解明するために、(1) 先端的計測・介入手法の開発、(2) 行動ダイアグラムの推定手法とその計算手法、(3) 行動実験による行動ダイアグラムの検証、を行う。ロボット制御、コンピュータビジョン、三次元計測、拡張現実感において有している実績を活用し、装着型ならびに環境型 χ ログロボットに組み込むための計測・介入手法を開発する。また、行動ダイアグラムの入出力関係のスパースモデリングを行い、行動に関与する要因をできるだけ少ない数で表現する。さらに、老化遺伝子に対する光遺伝学等を用いた介入や口腔細菌などの病原菌による化学的介入で線虫の行動とインタラクション変化を計測し、行動ダイアグラムの検証を行う。

中間評価実施時までには、(A) 行動ダイアグラムに関連するさまざまな推定手法の開発と(B) 各種の新規性を有する χ ログロボット開発を当初目標としていた。本報告までの期間では、とくに購買や逃避などのシチュエーションにおいて行動選択に到達するまでのプリミティブについてサイバー・フィジカル空間で検証するための手法の開発を目的とした。(2-1)で述べるような融合研究だけでなく個別研究においても論文を発表しており、当初の計画通りに進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は 2-2）

(A) ヒトの行動に関する法則の推定とマルチエージェントシミュレーションによる行動の解析：A02 前川班および A02 藤井班と共同して避難移動時や大規模イベント帰宅時の歩行者のモデルを導出して評価した。行動プリミティブの重みつき和で表現した移動モデルを導出し、コンサートホール避難訓練および花火大会帰宅時の駅への移動において実データを取得し、群集シミュレーションによりその妥当性を評価した（AAMAS2021, KDD2023, TRR2023）。

(B) 新規ログロボット開発：A02 前川班と共同して、動物種に応じた機能を有するログロボットを新規開発している。とくに、防水機能とバッテリー性能を高めた耐水性のものや、陸上の大型種に適した頑健なものを開発している。

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

(A) ヒトの購買行動の解析：コンビニエンスストア等の監視カメラで撮影された映像において、複数のヒトの相互作用や相互視線の頻度と長さから人間関係（客-客、店員-客等）を推定する手法を提案した。アテンションマップから、相互注視の手がかりに重点を置いていることを明らかにした（ROBIO2023）。

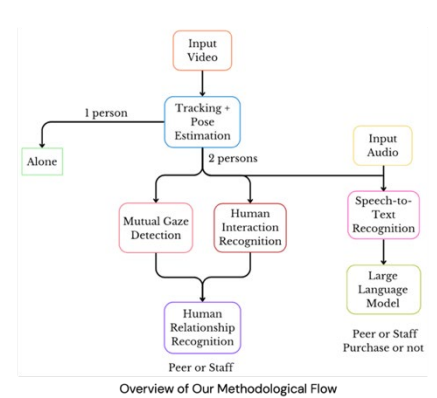


図 6.5-1 購買行動解析のための実験データセット、視線推定手法、音声解析と人間関係推定解析フロー

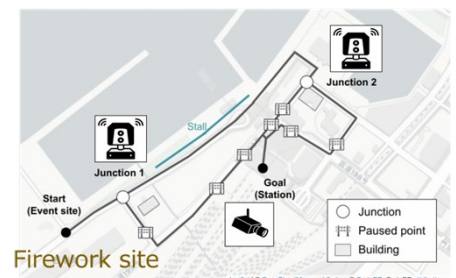


図 6.5-2 花火大会会場から駅に向かう経路に Lidar センサやカメラを設置し、ゲートで人流制御してモデルパラメータを推定した

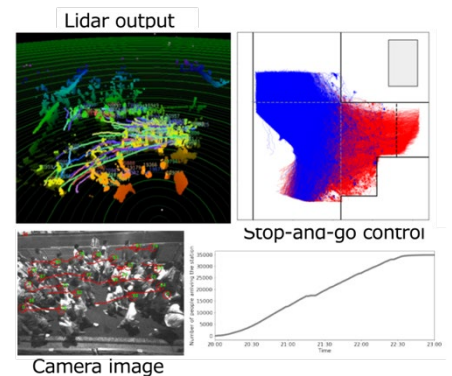


図 6.5-3 Lidar 出力、ゲート制御、カメラ画像、駅到着人数

(B) オンデマンド型乗合交通における乗合利用形態効率化：MaaS等の共同利用交通システム的设计において、利用者の利便性と運営者の投資効率・運営効率・交通渋滞などを考慮した最適化手法として乗合利用形態（Meeting Point）を提案し、その効率について解析した（IEEE Access 2022）。

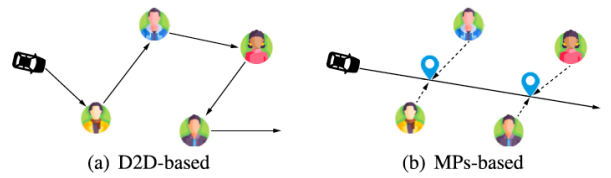
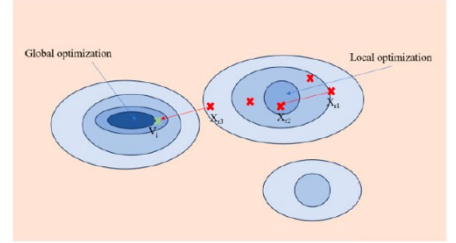
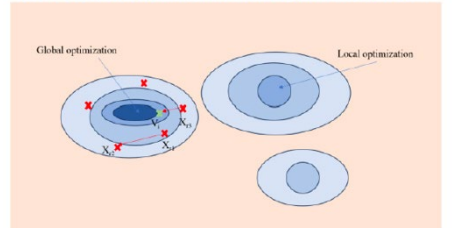


図 6.5-4 乗合形態（Meeting Point）の導入

(C) ブラックボックス最適化における樹状ニューロンモデル：最小化したい具体的な目的関数の形がわからなくても、ある入力に対する出力がわかれば次の探索点として適切な状態を決定し、再び評価値を得て次の探索点を探す手法をブラックボックス最適化という。差分進化手法（Differential Evolution）の新しいスケージング則を開発し、カオスマップ進化アルゴリズムとして定式化するとともに、その構造が樹状ニューロンモデルを用いた最適化に相当することを見いだした（CIIS2023, WCCI2024 to appear）。



(a) Situation that DE needs big scaling factor F



(b) Situation that DE needs small scaling factor F

(D) 現代医療と動物の処置に欠かせない全身麻酔はヒトと動物に鎮痛（知覚感受性の低下）と鎮静（意識レベル・運動性の低下）の側面において行動変容を引き起こす。動物の行動に対する麻酔介入による行動変容を定量化し行動メカニズムを明らかにするため、線虫をモデル系に用いてヒトの全身麻酔で主に用いられている麻酔薬セボフルランに着目し、線虫個体に投与するための線虫麻酔システムを開発した。AISCを用いてさまざまな条件（濃度・投与時間）で線虫に麻酔を投与した後、高速カメラで動物の行動を撮像し、行動解析プログラムで運動速度、体の屈曲角度、前進・後退運動頻度、運動の協調性などを計測し、麻酔介入による鎮静を定量的に評価する系を構築した。次にこのシステムを用いて線虫行動の鎮静に寄与するセボフルランの作用分子を探索し、神経伝達物質の開口分泌を制御するシナプス分子 Munc18/Sec1 が新規な候補分子として同定された（MicroPubl Biol. 2023, 2024）。

図 6.5-5 ブラックボックス最適化手法

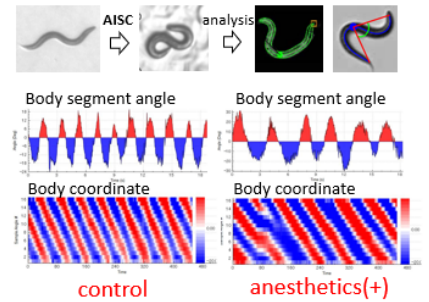


図 6.5-6 線虫麻酔介入システムによる介入実験

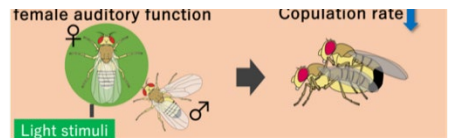


図 6.5-7 交尾行動のプロジェクション介入

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

(A) 公募・田中班と共同して、ショウジョウバエの交尾行動を自動認識し、オプトジェネティクスと個体ごとフィードバックプロジェクションによりメスの聴覚機能に介入し、交尾率を明確に低下させるシステムを開発した（ICN2024 to appear; Tanaka）。

(B) 公募・河端班と共同して、魚の行動解析において、採餌直前における餌の逃避がその後の行動に与える影響を調査するために、高速カメラと逃避ロボットを開発した（J. Exp. Biol., 2024）。

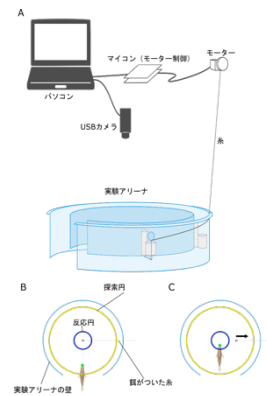


図 6.5-8 魚の採餌介入システム

研究項目 A02 前川班「自律的に計測・介入を行う χ ログボットのアルゴリズム開発」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

これまでの動物行動分析の研究では、生態や神経研究でのフィジカル空間におけるデータ計測の取り組みと、情報研究でのサイバー空間におけるデータ分析の取り組みが分離しており、対象行動の全貌を明らかにするまで計測と分析のサイクルを何度も繰り返す必要があった。このような課題を克服するため、本研究課題では (1)能動的人工知能を用いた計測・介入手法の研究と、(2)介入手段を備えた χ ログボットハードウェアの開発を行うことを領域設定期間内の目標としていた。

また、中間評価実施時までには、能動的にデータ計測および介入を行う装着型 χ ログボットを実現することを当初目標としていた。また、能動的人工知能を用いて、環境型ログボットが自動的に介入方策を考案、実行するための基盤技術を実装することを当初目標としていた。(2-1)で述べるように、融合研究だけでなく、個別研究に関しても人間行動認識や屋内位置推定に関する大きな成果を得ることができ、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は 2-2）

人工知能の好奇心に基づいて希少な映像撮影を行う装着型 χ ログボットを開発した。計算リソースの貧弱な装着型 χ ログボットで実現するため、普段とは異なる事象の発生への興味を人工知能の好奇心と定義し、外れ値検知手法によって自動的に検出された希少なイベントを撮影する。図 6.6-1 に示す提案手法では、常時稼働可能な加速度センサなどの低コストセンサを用いて対象生物を観察し、これらのセンサが珍しい行動を示す外れ値を検出すると自動的にカメラを起動して希少行動の記録を開始する。具体的には、初めにロガーを対象生物に搭載し、ラベルなしデータの収集を行う。次に、収集されたデータに教師なし学習を適用し、高コストな外れ値検出モデルを構築する。ここで構築された外れ値検出モデルは、メモリの都合上そのままではバイオロガーに搭載することができない。そこで、外れ値検出モデルを知識蒸留することでロガー搭載用の軽量な外れ値検出モデルを構築する。構築された外れ値検出モデルをロガーに搭載し、外れ値が検出されたタイミングで動画の撮影を開始することで、希少行動の自動録画が可能となる。A01 依田班との共同実験によって、オオミズナギドリの様々な新しい行動パターンを撮影することに成功し、その成果は PNAS Nexus に採択された。

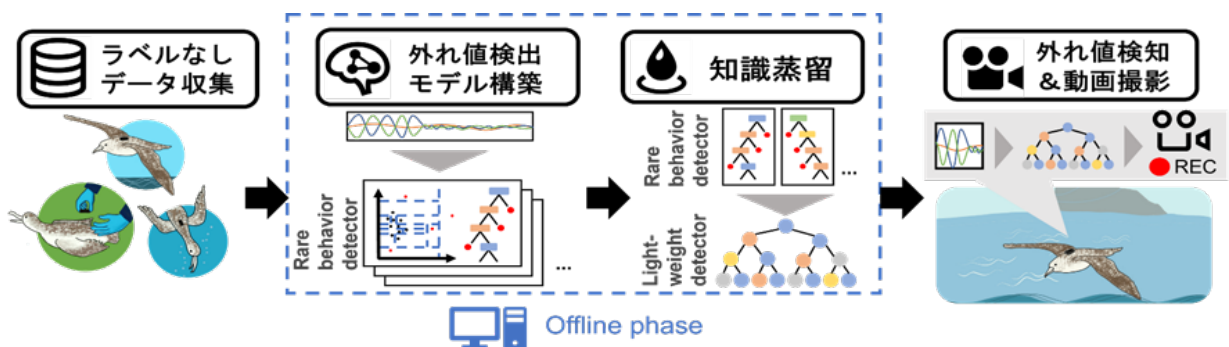


図 6.6-1 能動的な撮影を行う装着型 χ ログボットの動作の流れ

また、A01 依田班と共同で収集した海鳥の加速度データを用いて、深層学習を用いた動物行動認識手法の検討を行った。野生動物の行動認識の課題として、教師データの収集が困難であること、行動の個体差や装着位置の違いなどによって生じる様々なノイズ、そして種特有の複雑な行動などが挙げられる。このような課題を克服するため、さまざまなネットワーク構造や深層学習モデルの効率的な学習手

法を検証した。具体的には、深層学習モデルの効率的な学習手法として、データ拡張（スケールの変更、ノイズの追加、並び替え、時間ワープ、軸の回転）、Manifold mixup (Verma et al., 2019)、教師なし事前学習の有効性を検証した。データ拡張の効果はデータ拡張の種類とパラメータ、行動クラスによって異なったが、学習時に入力データに1つのデータ拡張をランダムに適用する方法によって多くの行動の精度が向上した。この成果は生物学的手法のトップ論文誌である *Methods in Ecology and Evolution* に採択された。また、採択された論文が論文誌のカバー写真に選ばれた（図 6.6-2）。

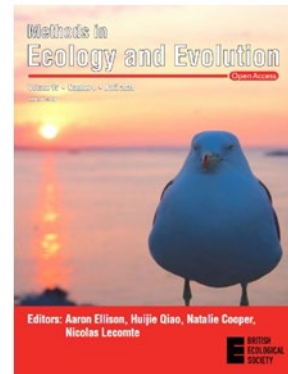


図 6.6-2 カバー写真に採択

高橋班らと協力して、環境型 χ ロボットを実現するための基盤技術を開発した。マウスや線虫のトラッキングのための高速骨格抽出手法などを開発し、論文執筆の準備を行っている。

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

領域の支援を受けて、人間の作業行動の大規模データセット OpenPack データセットを構築し、公開した。人間の複雑な作業行動に関する世界で最大のデータセットであり、その合計記録時間は 53 時間を超える。本データセットを様々な行動認識用の機械学習モデルに適用し、データセットや各モデルの特徴を分析することで、本データセットを用いた今後の研究の方向性を明らかにした。本データセット論文は、ユビキタスコンピューティングの最難関会議の一つである PerCom2024 に採択された。また本領域の支援を受けて、PerCom2023 にて OpenPack データセットを用いた作業行動認識コンペティション（コンペ）である OpenPack Challenge 2022 を開催し、100 名以上の参加者を集めた。

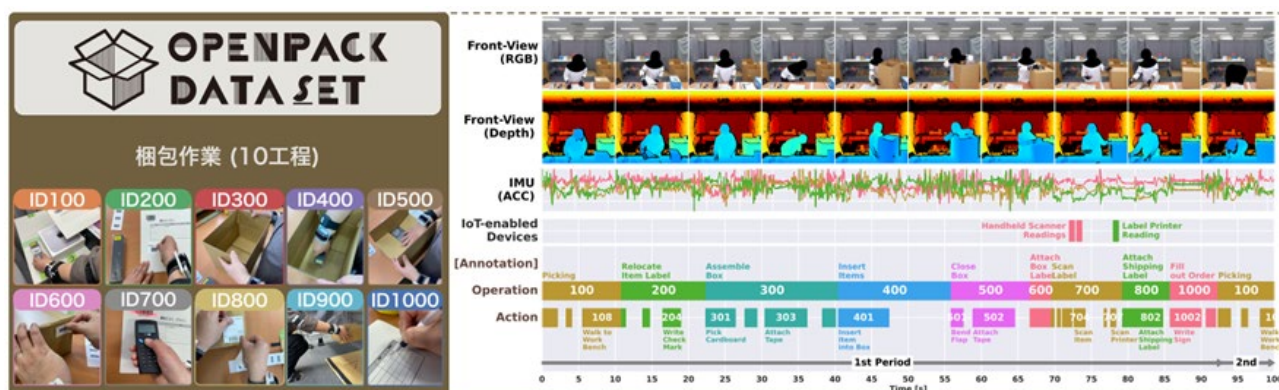


図 6.6-3 OpenPack データセットのサンプルデータ

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

能動的なデータ計測を行う装着型 χ ロボットを公募班が対象とする動物に展開する取り組みを行っている。公募・坂本班が対象とするウミガメに対して装着実験を行い、予備的な結果を得た（図 6.6-4）。また、公募・小池班が対象とするツキノワグマに装着するためのロガーの加工方法を検討し、図 6.6-4 右に示すような頑健なロガーを製作した。2024 年度に実際に野生のツキノワグマに対して装着実験を行う。

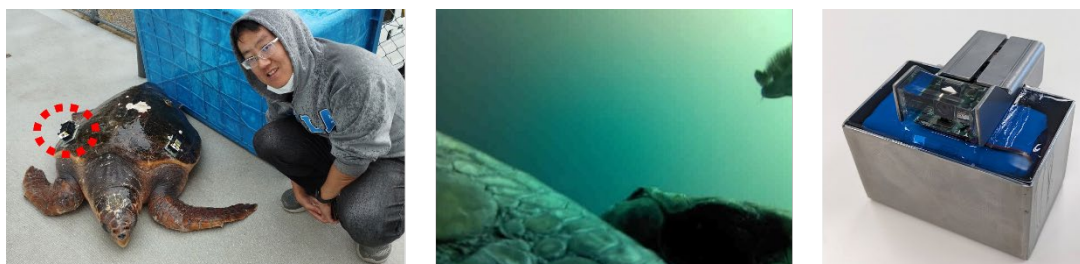


図 6.6-4 アカウミガメへのロガー装着実験の様子、ツキノワグマに装着する予定のロガー

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

本研究課題全体では、階層ナビゲーション研究のための (1) 数理・学習ベース解析手法と (2) 介入方法決定技術について研究を行う計画であった。(1) では、ヒトを含む動物の個体間相互作用における数理・学習ベースモデルを融合した解析手法を開発する計画であった。その際、A01 フィジカル班と協力してデータ計測・モデルの検証を行う計画であり、中間評価実施までにそのプロトタイプとなる手法を開発する予定であった。さらに新たな仮説や行動パターンを、行動データマイニングにより発見する手法を中間評価実施までに開発する予定であった。また、(2) ではデータから因果推論を行い、実験コストのため限られたデータを用いて介入の効果を検証する計画であり、中間評価実施までにそのプロトタイプとなる手法を開発する予定であった。また、報酬を所望の行動に設定した強化学習により、介入方策を自動的に決定する方法を開発する計画であり、中間評価実施までにそのプロトタイプとなる強化学習手法を開発する予定であった。

得られた成果としては、以下に述べるように、融合研究だけでなく、個別研究に関しても大きな進展が見られ、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究 (公募班との共同研究は 2-2)

(1) ルール・学習融合モデルの構築に関する研究については、カツオドリ、マウス、コウモリなどの生物集団の軌跡を用いて、これまで概念的であった動物行動学の理論モデルに基づいて、相互作用の規則を学習するための拡張行動モデルを開発し、機械学習のトップ国際会議 NeurIPS にて発表された [Fujii et al. NeurIPS, 2021]。この研究は A01 依田班、A01 高橋班、A01 飛龍班との融合研究であった。

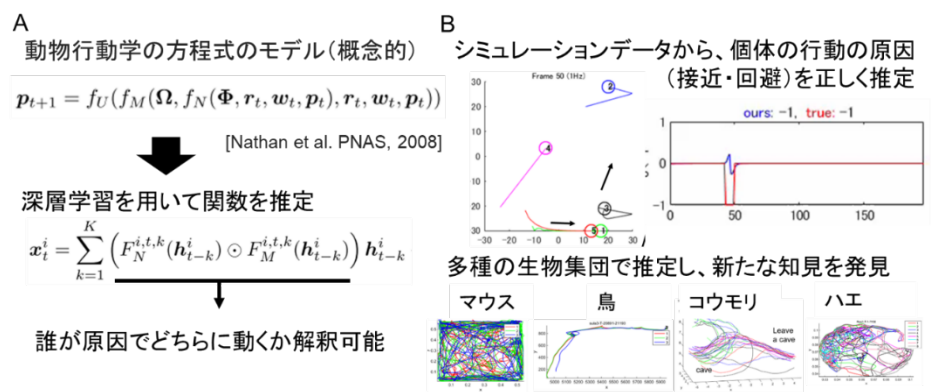


図 6.7-1 [Fujii et al. NeurIPS, 2021]の概要図。(A) 動物行動学の概念的な方程式のモデルにおける関数を、深層学習を用いて軌跡のデータから推定することにより、誰が原因でどちらに動くか、ということ解釈可能にした。(B) 検証ではシミュレーションデータを用いて、個体の行動の原因(接近・回避)を正しく推定できることを確かめた。次に多種の生物集団のデータから相互作用の規則を推定し、それぞれ新たな知見を得た

また、(2) ではマルチエージェントの複雑なシナリオでの反事実の経時的介入結果の推定手法を開発した。自動運転車のシミュレーションやスポーツの「介入」の効果を評価する上で非常に有用であり、従来の方法では考慮されていなかった共変量の反事実的予測とマルチエージェント関係の構造を組み入れた研究が地理情報の国際会議にて Best Poster Award を受賞した [Fujii et al. SIGSPATIAL, 2022]。その他にも反事実予測を魚群データや実際のスポーツデータから実現する手法に関する研究が IEEE TNNLS にて出版された [Fujii et al., IEEE TNNLS, 2024]。これらは A02 前川班との融合研究である。

さらに、集団移動の軌道予測手法 [Fujii et al., Neural Networks, 2024] の動物への応用として、A01 飛龍班と共同でコウモリの動きを模倣する機械学習モデリングを行い[Genda et al., BiRD, 2013 ; Teshima et al.

International Symposium of Hierarchical Bio-Navigation, 2024]、前者は工学系国際会議 PerCom の workshop にて Best Presentation Award を受賞した。

また、曖昧な相互作用による数理モデル集団運動の、臨界性の機能的二重性について明らかにした研究が計算論的生物学の国際雑誌 Plos Comp Biol で発表された[Niizato et al., Plos Comp Biol, 2023] (A02 川嶋班との融合研究)。

さらに最近、アユの多個体追跡に関する国際コンペティションを開催してその内容を記述した論文を、A02 川嶋班と共同で執筆し現在論文を修正中である。また、盲導犬と訓練する人間のキャリブレーションが不要な 3 次元姿勢推定に関する研究に関して、国際会議 CVPR の Workshop に採択された [Wang et al., CV4Animals, 2024]。

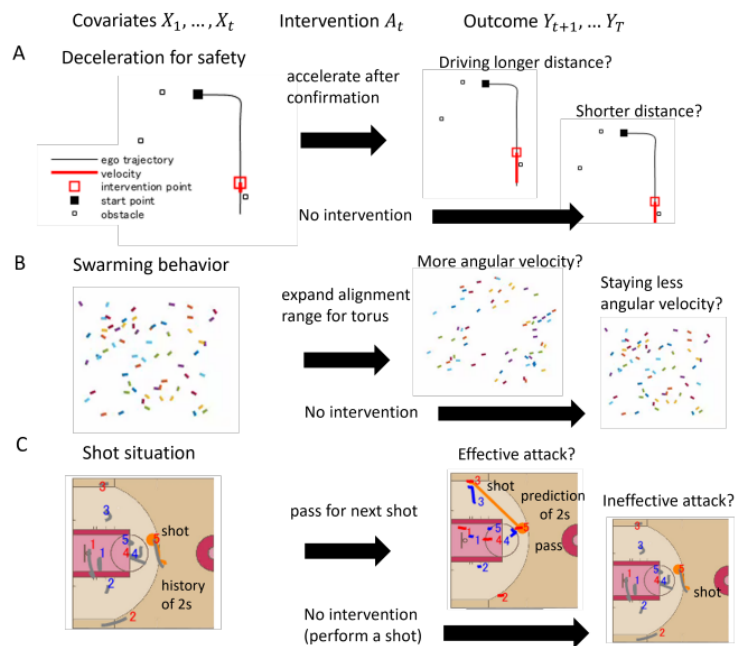


図 6.7-2 研究項目 (B) で扱った、(A) 自動運転車両シミュレーション、(B) 魚群シミュレーション、および (C) 実際のバスケットボールにおける介入の例

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

個別研究としては、集団スポーツの移動軌跡におけるデータマイニングのための比較分析手法[Zhang et al., IEEE Access, 2023]や、強化学習に基づきスポーツのデータを使用して行動価値関数を推定する研究 [Nakahara et al., IEEE Access, 2023]、学習が難しい下位の運動機構を理論モデルで、上位の意思決定を強化学習でモデル化した研究が出版された[Tsutsui et al., ICML Workshop, 2023]。特に、実世界の生物学的マルチエージェントをモデル化する際の問題として、実世界と強化学習の仮想環境との間のドメインギャップが挙げられるが、この問題に対する新しい手法を提案し、国際会議にて論文が出版された [Fujii et al., ICAART, 2024]。

また、人間や動物の運動を計測し、その特徴を定量化したり機序を解明したりする研究については、人間の歩行者集団の移動や視線を計測して、回避行動のための自発的な協調行動について明らかにした研究[Murakami et al., iScience, 2022] や、カニの集団における求愛と捕食回避の間での合理的な立ち回りを明らかにした研究[Takeshita & Nishiumi, Behavioral Ecology and Sociobiology, 2022]などが論文として発表された。

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

公募・田中班と協力し、生物のような協力的な移動を行う自律型強化学習モデルのシミュレーションの研究が出版された[Tsutsui et al., eLife, 2024]。また、公募・津田班と協力し、[Fujii et al., NeurIPS, 2021]の手法をゼブラフィッシュに適用した研究を国際シンポジウムにて発表した[Simoyama et al., International Symposium of Hierarchical Bio-Navigation, 2024]。また、スポーツ映像に関するキャリブレーションが不要な 3 次元姿勢推定に関する研究に関して、公募・延原班と共同研究を開始している。

研究項目 A02 牧野班「遠隔触覚刺激・二次元通信を用いた行動介入基盤の開発と行動予測に基づく動作解析」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

本研究課題では、(1)刺激前に動物に気づかれない介入プラットフォームの実現として、(1-a)空中超音波による不可視遠隔介入と、(1-b)二次元通信による行動観察プラットフォームの2つの基礎技術の研究を行うこと、また2つ目のトピックとして(2)ヒトと動物の間の相互介入の理解と応用を目標に、熟達した盲導犬訓練士と初心者との間で、ヒトの指示動作が誘起する犬の行動の違いを明らかにすることを目標として研究を行っている。

前者については、どちらの技術もこれまで人以外の動物を対象としていなかったため、中間評価実施時までには「それぞれの介入装置が動物を対象とした実験で利用でき、これまでにない介入手法としての価値を持つことを明らかにする」ことを当初目標としていた。(2-1)で述べるように、領域内の融合研究が広く進み、当初の計画以上に進展している。後者については「盲導犬歩行のモデル化のための数値化を実現する3次元モデルの構築」を中間審査までの目標としており、実際に解析ができるところまでモデル化が進んでいる。また迫体験によるベテラン訓練士の技術伝承のためのVRシステムの実現や力の可視化の試みも進んでおり、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は2-2）

(1-a) 超音波刺激を新しい動物の行動介入のツールとして利用したいという考えのもと、計画班内の共同研究を複数行い、それぞれで有用性の基礎検証を終えている。

A01 西森班の久本が対象とするアリに対して、搬送されている餌に超音波を照射してその重量を変化させ、アリの挙動変化を観察する手法を実現した。野外で利用できる充電駆動のポータブル超音波照射装置を新規に実現し、カラートラッキングされた疑似餌に対して超音波を照射し、その重量を変化させる（図 6.8-1）。これまでに、重量変化に伴ってアリの運搬速度が変化すること、その時の各脚の動かし方に特徴が現れることなどが確認されている。（日本生態学会大会, 2023）

A02 藤井班の西海とともにトンボを対象として、超音波を利用して疑似餌を3次的にマニピュレーションする手法を実装した。超音波フェーズドアレイでは、定在場により軽量物体を3次元制御できることが知られている。これを利用し、トンボの捕食対象であるハエの挙動を3次元位置制御できる疑似餌で実現し、トンボの採餌行動のモデル化に活用する。これまでに高速カメラを利用して疑似餌となる軽量ビーズをトラッキングし、回避行動を模した移動を行うシステムを実現しトンボがこの環境下で通常の行動を取ることを確認している。今年度以降実際に、トンボがどのような捕食行動を起こすかの観察実験を行う。

A01 西森班の白石が利用する超小型RFIDを利用したアリの行動計測システムについて、そのRFIDの読み取りエラーを低減させるために、利用しているアンテナの送受信特性を明らかにし、その性能向上のためのアンテナの設計を行っている。

外部からの介入と動物行動のモデル化という観点で、A02 藤井班の協力を得ながら盲導犬訓練時の訓練（人からの介入）と結果としての犬の行動変化の関係を数理的に明らかにする研究を行っている。これまでに、カメラ画像から人と犬の骨格を抽出し、その間の距離や姿勢の変化を定量評価するための基



図 6.8-1 屋外でも利用可能なポータブル超音波システム（上）実際にアリの行動に介入している様子（下）

礎的な解析システムを実現した。人と盲導犬は常に互いを遮蔽しあう位置関係にいたるため、複数カメラを適切に連動させて骨格を再構成する手法となっている。今後数理モデル化を進める。

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

ショウジョウバエ幼虫を対象とした介入では、超音波刺激によりショウジョウバエ幼虫を特定の領域に限定して拘束できることを発見し、その基礎特性について検証した。図 6.8-2 はショウジョウバエ幼虫の移動履歴を個体ごとに異なる色で表示したものである。図に示すように、円形のエリアの外に出そうなときに超音波刺激を加えることで特定の範囲内に長時間拘束し、安定した観察が可能となる (NEURO2024 で発表予定)。

トンボを対象とした軽量物体の 3 次元制御では、高速カメラを利用した制御システム自体にも新規性があり、ロボティクスメカトロニクス講演会 2023 にてポスター発表を行い、日本機械学会 ROBOMECH 表彰 (学術研究分野) および日本機械学会若手優秀講演フェロー賞を受賞予定である。

マウスなどの小動物への介入の観点で、1cm オーダーの小物体を自由に駆動させる超音波を利用した手法を実現した。1cm 程度のサイズの対象は、モータ等で駆動するには大きすぎ、また生物が誤って食べてしまうことなどを考えると磁性体などは利用したくない。音響透過スクリーンを利用して可食物体を 2 次元面内で駆動する手法を実現した (IEEE ACCESS, 2024, SICE SI 2023、優秀講演賞受賞)。

人の意図的な介入である行動指示と、それに伴う犬の行動変化の様子を主観視点で体験するための VR システムの実現も行っている。日本盲導犬協会の協力のもと、360 度映像を利用した没入型の体験システムを試作し、その有用性の実証に取り組んでいる。また、与えられた力を計測し可視化して提示する手法 (センシングフォーラム 2023)、及びそれを触覚フィードバックして訓練に活かすシステム (WHC 2023、IEEE SMC 2023) も提案し開発を行った。

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

(1-b) 公募・坂本班が対象とするオオミズナギドリで利用されるバイオリビング端末に対して、人工巣で遠隔給電を行えるようにし、端末を回収することなく、長期の観察を可能とする手法の実現を目指している。磁界結合方式の人工巣箱と受信用カプラのセットを開発し、受信用端末のバッテリーを充電するのに必要な電力を供給可能であると確認した

(図 6.8-4)。また、人工巣の中にオオミズナギドリを配置し、一定以上の磁場を付与してもその後の行動に影響を与えないことを確認している。なお本研究は日本機械学会若手優秀講演フェロー賞を受賞した (2024 年 5 月 30 日)。

当初計画していた基礎技術の活用とは別に、新たに設計し取り組んだのが、局所磁場制御による動物行動への介入である。これは A01 高橋班の高橋、牧口、公募・坂本班と共同で、マスやウミガメに対して実験を始めている。光学実験で利用されるマグネットベースに発想を得て、局所的な磁場の方向を切り替えられるシステムを作成した。接触部位から 3mm 程度離れた場所で地磁気の 10 倍程度の磁場強度となるようなデバイスを試作し頭部に搭載して検証することを目指す。これをサーボモータで駆動する小型介入装置を実装し、マスとウミガメそれぞれに対して、基礎的な検討を始めている。

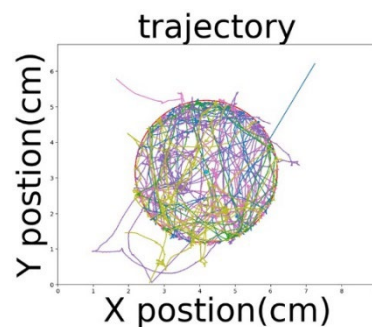


図 6.8-2 ショウジョウバエ幼虫の円形領域へのトラップ

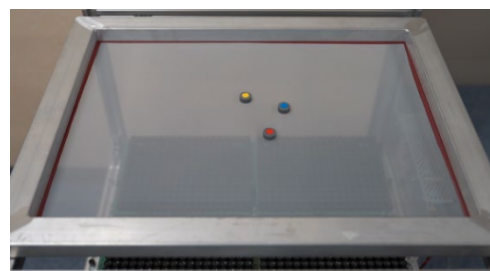


図 6.8-3 1cm 程度の可食物体の駆動



図 6.8-4 人工巣箱内での給電検証

研究項目 A02 川嶋班「データ駆動型 Swarm-Machine インタラクション技術の創出」

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとしたか

魚類をはじめとする生物のインタラクション（個体間相互作用）のモデルを計測データから獲得し、さらに実際に生物群へ介入して検証を行うことで、群知能を支える群れ内部の動的な因果構造や社会構造の解明を目指す。本研究では、フィジカル空間における計測と介入、およびサイバー空間における計測結果からのモデリングや介入方策決定を密に結合させたフィードバック・ループの枠組みを設計し、実際のシステムとして構築することを目的とする。主に魚群に対し、詳細なインタラクションモデルをデータ駆動で学習するとともに、各種の生物群でモデリング技術の汎用性を検証する。

中間評価実施時までには、個体追跡手法の高精度化や安定化を進めるとともに、群れの個体間相互作用モデリング手法の開発や、魚群の誘導実験に用いることのできる各種の介入方式を明らかにし、介入実験装置のプロトタイプを設計することを当初目標としていた。(2-1)で述べるように、追跡やモデリング手法について融合研究を進めるとともに、個別研究に関しても、魚だけでなく人同士の相互作用の数理モデル化に関して論文発表を行うなど、当初の計画以上に進展している。

(2-1) 計画研究で得られた成果

(2-1-1) 領域内融合研究（公募班との共同研究は 2-2）

(a) 高精度個体追跡手法の開発：A01 飛龍班と共同で実施しているコウモリの飛翔映像の解析においては、暗所を高速で飛翔するコウモリを検出・追跡する必要がある。物体の検出では変化領域を前もって絞り込む処理を導入して誤検出を抑え、実映像を用いた評価により 80%程度の精度で検出ができることを示した (e.g., Sugimoto et al., 2023)。

(b) 階層ナビゲーション理解のための数理モデリング基盤構築：階層ナビゲーションを理解するには、集団の中でどのように情報を統合し、分配するかのプロセスを理解することが必須である。そこで A02 藤井班と協力しながら、アユの群れを統合情報理論で分析することで、局所的な臨界状態というこれまで指摘されてこなかったメソスコピックなダイナミクスを明らかにした (Niizato et al., 2024 submitted)。また、既存の Boid モデルを拡張した新たな数理モデル (図 6.9-1) を開発することにより、群れの大規模な方向転換で起こっている情報構造と群れの形態変化が果たす役割という、階層ナビゲーション理解の基盤となる研究を進めた (Niizato et al., 2023)。

(c) トラッキングチャレンジへのデータ提供：本領域主催で開催したコンペティション Fish Tracking Challenge 2024 (<https://ftc-2024.github.io/>) にアユのデータセット (10 個体が水槽内で群泳する映像データおよび各フレームにおける各個体の正解 2 次元座標のデータ) を提供した。本データはオープンデータセットとして利用でき、水面における波の影響や個体間の重なりなどに対する頑健な魚群個体追跡手法の開発を促進することが期待できる。

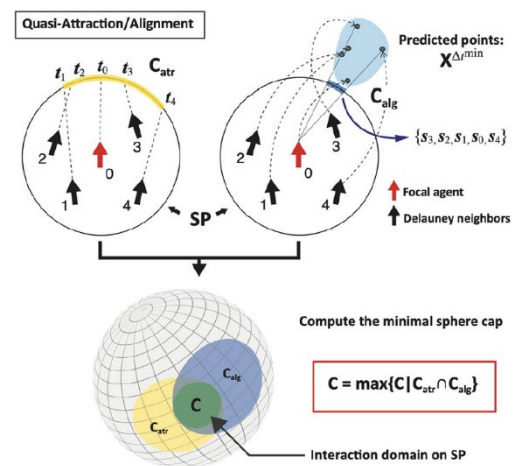


図 6.9-1 各個体が進む方向を包括領域として共有することで群れ行動を説明するモデル

(2-1-2) 特筆すべき個別研究

(a) 個体検出、追跡、計数技術の開発

(a-1) アユの個体追跡技術の開発：個体検出手法で得られた断片的な移動軌跡（トラックレット）を対応付けることでより長い時間での移動情報を獲得する技術を開発した。さらに、俯瞰映像における検出と追跡を精度良く行うために、検出・追跡の単位となる外接矩形を個体の姿勢に応じて回転

させる手法を開発し、その基本的な有効性を示した（村上他，三宅他，IPSJ 全国大会 2024）。さらに、高解像度化や体軸推定を組み合わせた追跡手法の基盤技術を開発した（米川他，田頭他，SICE SI 講演会 2023）。

(a-2) 魚群の個体計数技術の開発：養殖魚の計数ではリアルタイム性が重要であり、大量の魚が水路を高速で流れていく中での処理が必要である。現在までに、このうち後者に着目して、上述のコウモリやアユの検出・追跡技術を適用し、機械学習による魚の検出と、その結果を用いた追跡による計数手法を開発し、高フレームレートでは十分な精度が得られることを示した（西口 IPSJ 全国大会）。

(b) 群れの個体間相互作用の数理モデル開発

(b-1) 個体間相互作用ネットワーク推定：魚群の階層ナビゲーションを解析するために、個体追跡後の軌跡データを入力として、個体間相互作用ネットワークを推定するための最小限のモデルを開発した。各個体が他個体によって影響を受ける項と自律的に行動する項から成るため、個体の特徴づけに応用可能であることを示した（図 6.9-2, Kawashima, 2023）。

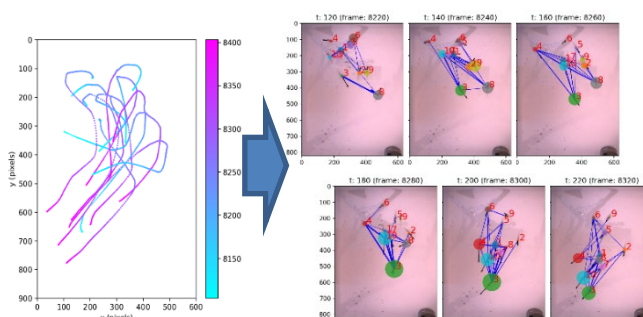


図 6.9-2 (左) 各個体の座標変化. (右) 推定された相互作用

(b-2) 同期を伴う人同士の相互作用の数理モデル化：拍手による人と人との相互作用の背後にある時間感覚の変容を明らかにし、その実験結果を数理モデル化することで、ジョイントラッキングとして知られる現象を説明できることを示した（Niizato et al., 2024）。加えて、同期現象におけるモダリティ（聴覚・視覚）の役割の研究も進めている（小池他，SICE SI 講演会 2023）。

(b-3) 階層ナビゲーションに関連した脳神経活動の同定：ナビゲーションでは様々な情報を統合して一つの認知活動へと結び付ける必要がある。そこで、視覚と触覚の不整合が引き起こすラバーハンド錯覚の現象を、統合情報理論を用いることで脳波と身体的な生理現象との不整合として説明できることを示した（Niizato et al., 2022）。さらに、ストレス化における情動と情報揺らぎの関係へと拡張した研究も現在進行中である（Niizato et al., in review）。

(c) 階層ナビゲーション理解のための介入技術の開発

魚群への介入モダリティとして、視覚や触覚に作用する魚型ロボットの開発を進めている他、視覚に作用する刺激として、ディスプレイやプロジェクターによる介入技術の開発を進めている。特にプロジェクターでは、投影パターンだけでなく、投影する色の影響も無視できない。我々はアユがさまざまな光環境下で異なる質の運動をすることを見出しており（大橋，本領域国際シンポジウム 2024）、このような介入の設計には 2-1-1(b) で述べた局所的な臨界性という概念が必要であり、その重要性についての仮説が得られた（新里，人工知能誌 2023）。

(2-2) 計画研究と連携している公募研究で得られた成果

(a) 複数のオタマジャクシ表現型における遊泳特性の違い：捕食者と被捕食者の関係は、長期的には被捕食者の姿形だけでなく運動能力にも作用する可能性がある。そこで公募・岸田班と連携して、エゾアカガエル幼生の形態的表現型の誘導（形状の違い）と遊泳特性との関係を、画像を入力とした個体の姿勢追跡を通じて定量化することに成功した（松浦他，日本生態学会 2024）。

(b) 群れの集団特徴を記述するための新たな指標の検討：ショウジョウバエの一部の種は群れを形成することが報告されており、この群れを形成する度合いを定量化するために、公募・田中班と連携して、グラフ理論に基づく新たな指標を提案した（本領域国際シンポジウム 2024）。

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、主催シンポジウム等の状況。令和6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。

研究項目 A01 依田班「多次元バイオロギングによる野生動物のナビゲーションの多階層的理解」

- Y. Goto*, H. Weimerskirch, K. Fukaya, K. Yoda, K. Sato, Albatrosses employ orientation and routing strategies similar to yacht racers. PNAS, 121, e2312851121, 2024.
- S. Koyama*, Y. Mizutani, S. Matsumoto, K. Yoda, Interannual linkages between oceanographic condition, seabird behaviour, and chick growth from a decadal bio-logging study, Animal Behaviour, 209, 63-81, 2024.
- L. Clark*, T. Yamamoto, K. Yoda, 他 201 名, Global assessment of marine plastic exposure risk for oceanic birds, Nature Communications, 14, 3665, 2023.
- Y. Goto*, K. Yoda, Developments of theories of avian movement strategies in wind and their validation with bio-logging data. Journal of the Physical Society of Japan, 92, 121006, 2023.
- Y. Goto*, K. Yoda, H. Weimerskirch, K. Sato, How did extinct giant birds and pterosaurs fly? A comprehensive modeling approach to evaluate soaring performance. PNAS Nexus, 1, pgac023, 2022.
- K. Krishnan*, K. Yoda, 他 27 名, The role of wingbeat frequency and amplitude in flight power. Journal of the Royal Society Interface, 19, 20220168, 2022.
- E. Lempidakis*, E. L. C. Shepard*, A. N. Ross, S. Matsumoto, S. Koyama, I. Takeuchi, K. Yoda, Pelagic seabirds reduce risk by flying into the eye of the storm. PNAS, 119, e2212925119, 2022.

研究項目 A01 飛龍班「音響サイバー空間を利用したコウモリの階層ナビゲーションの理解」

- S. Yoshida, K. Hase*, O. Heim, K. I. Kobayasi, S. Hiryu, Doppler detection triggers instantaneous escape behavior in scanning bats, iScience, 27, 109222, 2024.
- K. Yoshino-Hashizawa*, Y. Nishiuchi, M. Hiragochi, M. Kihara, K. I. Kobayasi, S. Hiryu*, The distress context of social calls evokes a fear response in the bat *Pipistrellus abramus*, Journal of Experimental Biology, 226, Jeb246271, 2023.
- N. Yoshifumi, F. Emyo*, O. Heim, A. Nomi, D. Fukui, S. Hiryu, A glimpse into the foraging and movement behaviour of *Nyctalus aviator*; a complementary study by acoustic recording and GPS tracking, Royal Society Open Science, 10, 230035, 2023.
- Y. Teshima*, M. Mogi, H. Nishida, T. Tsuchiya, K. I. Kobayasi, S. Hiryu, Discrimination of object information by bat echolocation deciphered from acoustic simulations, Royal Society Open Science, 11, 231415, 2023.
- K. Hase*, K. I. Kobayasi and S. Hiryu, Effects of acoustic interference on the echolocation behavior of bats, In: Acoustic Communication in Animals: From Insect Wingbeats to Human Music (Bioacoustics Series Vol. 1), Springer 2023.
- Y. Mizuguchi, E. Fujioka*, O. Heim, D. Fukui, S. Hiryu, Discriminating predation attempt outcomes during natural foraging using the post-buzz pause in the Japanese large-footed bat, *Myotis macrodactylus*, Journal of Experimental Biology, 225, jeb243402, 2022.
- Y. Teshima*, Y. Hasegawa, T. Tsuchiya, R. Moriyama, S. Genda, T. Kawamura, S. Hiryu, Reconstruction of echoes reaching bats in flight from arbitrary targets by acoustic simulation, Journal of Acoustic Society of America, 151, 2127-2134, 2022.
- Y. Teshima*, Y. Yamada, T. Tsuchiya, O. Heim, S. Hiryu, Analysis of echolocation behavior of bats in "echo space" using acoustic simulation, BMC Biology, 20, 59, 2022.

研究項目 A01 高橋班「場所細胞・格子細胞活動の計測と操作による階層ナビゲーションの機能解明」

- S. Takahashi*, F. Sawatani, K. Ide, Emergence of the hippocampus as a vector for goal-directed spatial navigation, In: Cheung-Hoi Yu, A., Li, L. (eds) Systems Neuroscience. Advances in Neurobiology, Springer, 2024.
- Y. Makiguchi*, Y. Iimura, K. Nakao, H. Nii, H. Ueda, M. Nagata, Movement patterns of Japanese crayfish revealed by long-term tracking with a passive integrated transponder tag system, Hydrobiologia, 2024.

- Y. Tamatsu, H. Azechi, R. Takahashi, F. Sawatani, K. Ide, F. Fujiyama, S. Takahashi*, Optogenetic activation of the VTA-hippocampal pathway facilitates rapid adaptation to changes in spatial goals. *iScience*, 26, 108536, 2023.
- F. Sawatani*, K. Ide, S. Takahashi*, The neural representation of time distributed across multiple brain regions differs between implicit and explicit time demands. *Neurobiology of Learning and Memory*, 199, 107731, 2023.
- K. Ide, S. Takahashi*, A review of neurologgers for extracellular recording of neuronal activity in the brain of freely behaving wild animals. *Micromachines*, 13(9), 1529, 2022.
- F. Sawatani, Y. Tamatsu, K. Ide, H. Azechi, S. Takahashi*, Utilizing a reconfigurable maze system to enhance the reproducibility of spatial navigation tests in rodents. *Journal of Visualized Experiments*, 190, e64754, 2022.
- S. Takahashi*, T. Hombe, S. Matsumoto, K. Ide, K. Yoda*, Head direction cells in a migratory bird prefer north. *Science Advances*, 8, 2022.

研究項目 A01 西森班「アリコロニーの全個体識別長時間計測と組織ダイナミクスの系統的解析」

- M. Yoshikaia, M. Matsuo, N. J. Suematsu, H. Nishimori, Satoshi Nakata, Can self-propelled objects escape from compression stimulation?, *Soft Matter*, d4sm00288a, 2024.
- M. Kuze, Y. Kubodera, H. Hashishita, M. Matsuo, H. Nishimori, S. Nakata, Self-propulsion mode switching of a briggs-rauscher droplet, *ChemSystemsChem*, VOL.5, e202200030(1-5), 2023.
- A. Koto., M. Tamura., W.P. Shan, S. Aburatani, E. Privman, S. Stoffel, A. Crespi, K.S. McKenzie., La C. Mendola, T. Kay, L. Keller, Social isolation shortens lifespan through oxidative stress in ants, *Nature Communications*, Vol.14, pp. 5493, 2023.
- S.Suenami, A. Koto, R.Miyazaki, Basic Structures of Gut Bacterial Communities in Eusocial Insects, *Insects*, Vol.14, 444(1-17), 2023.
- H. Goko, O. Yamanaka, M. Shiraishi, H. Nishimori, Characteristics of daily foraging activity of *Camponotus japonicus* via time series analysis, *Plos one*, Vol.18, e0293455, 2023.
- U. Shimabukuro, A. Takahashi, J. Okado, N. Kokubun, J.B. Thiebot, A. Will, Y. Watanuki, B. Addison, S.A. Hatch, J.M. Hipfner, L. Slater, B.A. Drummond, A.S. Kitaysky, Across the North Pacific, dietary-induced stress of breeding rhinoceros auklets increases with high summer Pacific Decadal Oscillation index, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.708, 177-189, 2023.
- M. Shiraishi, O. Yamanaka, H. Nishimori, Effect of interaction network structure in a response threshold model, *Artificial Life and Robotics*, VOL.27, 743-750, 2022.
- O. Yamanaka, Y. Oki, Y. Imamura, Y. Tamura, M. Shiraishi, S. Izumi, A. Awazu, H. Nishimori, Ants Alter Collective Behavior After Feeding and Generate Shortcut Paths on a Two-Dimensional Foraging Area, *Frontier in Physics*, VOL.10, 896717, 2022.
- M. Shiraishi, T.Odan, O.Yamanaka, H. Nishimori, Influence of labor conditions and interaction among individuals on circadian activity rhythms in the ant *Camponotus Japonicus*, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 33, 582-589, 2021.

研究項目 A02 橋本班「 χ ロボット開発とスパースモデリングによる行動ダイアグラムの解明」

- K. Tominami, TA Kudo, T. Noguchi*, Y. Hayashi, YR Luo, T. Tanaka, A. Matsushita, S. Izumi, H. Sato, K. Gengyo-Ando, A. Matsuzawa, G. Hong, J. Nakai, Physical Stimulation Methods Developed for In Vitro Neuronal Differentiation Studies of PC12 Cells: A Comprehensive Review. *Int J Mol Sci* 25(2):772, 2024.
- K. Gengyo-Ando*, M. Kumagai, H. Ando, J. Nakai, Domain 3a mutation of VPS33A suppresses larval arrest phenotype in the loss of VPS45 in *Caenorhabditis elegans*. *MicroPubl Biol.* 2024.
- M. Tanonwong, N. Chiba, K. Hashimoto*, Recognition of Human Relationships Using Interactions and Gazes through Video Analysis in Surveillance Footage, 2023 IEEE ROBOTICS 2023.
- R. Nishida*, M. Onishi, K. Hashimoto, Crowd Simulation Incorporating a Route Choice Model and Similarity Evaluation using Real Large-scale Data, *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2023*, 2751-2753, 2023.
- R. Nishida*, Y. Tanigaki, M. Onishi, K. Hashimoto, Multi-Objective Deep Reinforcement Learning for Crowd

Route Guidance Optimization, Transportation Research Record 2023.

- Z. Ye, H. Yang*, N. Chiba, K. Hashimoto, Comparative Study of Hybridization and Parameter Tuning Improvement Methods for EAs in WFLOP, ACM International Conference Proceeding Series, 59-65, 2023.
- K. Gengyo-Ando*, M. Tateyama, S. Mitani, H. Ando, J. Nakai, A humanized *Caenorhabditis elegans* model for studying pathogenic mutations in VPS45, a protein essential for membrane trafficking, associated with severe congenital neutropenia. *MicroPubl Biol.* 2023.
- R. Nishida*, R. Kanamori, M. Onishi, I. Noda, K. Hashimoto, Simulation Analysis on Benefits of Introducing Meeting Points Into On-Demand Shared Mobility Services, *IEEE Access* 10, 124114-124129, 2022.
- H. Sato*, H. Kunitomo, X. Fei, K. Hashimoto, Yuichi Iino, Glutamate signaling from a single sensory neuron mediates experience-dependent bidirectional behavior in *Caenorhabditis elegans*, *Cell reports*, 35(8), 109177-109177, 2021.
- S. Ueda, S. Kagami*, K. Hashimoto, MetamorHockey: A Projection-based Virtual Air Hockey Platform Featuring Transformable Mallet Shapes, Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference Emerging Technologies, SIGGRAPH 2021, 7-4, 2021.

研究項目 A02 前川班「自律的に計測・介入を行うχログボットのアルゴリズム開発」

- N. Yoshimura, J. Morales, T. Maekawa, T. Hara, OpenPack: A Large-scale Dataset for Recognizing Packaging Works in IoT-enabled Logistic Environments, *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2024)*, 90-97, 2024.
- R. Otsuka*, N. Yoshimura, K. Tanigaki, S. Koyama, Y. Mizutani, K. Yoda, T. Maekawa*, Exploring deep learning techniques for wild animal behaviour classification using animal-borne accelerometers, *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 15, Issue 4, 2024.
- K. Tanigaki, R. Otsuka, A. Li, Y. Hatano, Y. Wei, S. Koyama, K. Yoda, T. Maekawa*, Automatic recording of rare behaviors of wild animals using video bio-loggers with on-board light-weight outlier detector, *PNAS Nexus*, Vol. 3, Issue 1, 2024.
- T. Dissanayake, T. Maekawa, T. Hara, Joint Estimation of the Distance and Relative Velocity of Obstacles via Smartphone Active Sound Sensing for Pedestrian Safety, *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2023)*, 32-42, 2023.
- T. Kumrai, J. Korpela, Y. Zhang, K. Ohara, T. Murakami, H. Abeysekera, T. Maekawa*, Automated construction of Wi-Fi-based indoor logical location predictor using crowd-sourced photos with Wi-Fi signal, *Elsevier Pervasive and Mobile Computing (PMC)*, Vol. 89, pp. 101742, 2023.
- J. Morales, N. Yoshimura, Q. Xia, A. Wada, Y. Namioka, T. Maekawa*, MGA-Net+: Acceleration-based packaging work recognition using motif-guided attention networks, *Elsevier Pervasive and Mobile Computing (PMC)*, Vol. 88, 101735, 2023.
- H. Zhou, T. Maekawa*, GPS-assisted Indoor Pedestrian Dead Reckoning, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, Vol. 6, Issue 4, No. 166, 2022. (Presented at UbiComp 2023)
- K. Tanigaki, T. C. Teoh, N. Yoshimura, T. Maekawa*, T. Hara, Predicting Performance Improvement of Human Activity Recognition Model by Additional Data Collection, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, Vol. 6, Issue 3, No. 142, 2022. (Presented at UbiComp 2022)
- N. Yoshimura, T. Maekawa*, T. Hara, A. Wada, Y. Namioka, Acceleration-based Activity Recognition of Repetitive Works with Lightweight Ordered-work Segmentation Network, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, Vol. 6, Issue 2, No. 86, 2022. (Presented at UbiComp 2022)

研究項目 A02 藤井班「階層ナビゲーションのための数理・学習ベース解析手法と介入方策決定技術」

- K. Tsutsui*, R. Tanaka, K. Takeda, K. Fujii, Collaborative hunting in artificial agents with deep reinforcement learning, *eLife*, 2024.
- K. Fujii*, K. Tsutsui, A. Scott, H. Nakahara, N. Takeishi, Y. Kawahara, Adaptive action supervision in

reinforcement learning from real-world multi-agent demonstrations, International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2024), vol. 2, pp. 27-39, 2024.

- K. Fujii*, K. Takeuchi, A. Kuribayashi, N. Takeishi, Y. Kawahara, K. Takeda, Estimating counterfactual treatment outcomes over time in complex multi-agent scenarios, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024.
- K. Fujii*, N. Takeishi, Y. Kawahara, K. Takeda, Decentralized policy learning with partial observation and mechanical constraints for multiperson modeling, Neural Networks, vol. 171, pp. 40-52, 2024.
- K. Tsutsui*, K. Takeda, K. Fujii, Synergizing Deep Reinforcement Learning and Biological Pursuit Behavioral Rule for Robust and Interpretable Navigation, 1st Workshop on the Synergy of Scientific and Machine Learning Modeling (SynS and ML) co-located with the International Conference on Machine Learning (ICML'23), 2023.
- H. Nakahara, K. Tsutsui, K. Takeda, K. Fujii*, Action valuation of on- and off-ball soccer players based on multi-agent deep reinforcement learning, IEEE Access, vol. 11, pp. 131237-131244, 2023.
- T. Niizato*, H. Murakami, T. Musha, Functional duality in group criticality via ambiguous interactions, PLoS Computational Biology, vol. 19, no. 2: e1010869, 2023.
- K. Fujii*, K. Takeuchi, A. Kuribayashi, N. Takeishi, Y. Kawahara, K. Takeda, Estimating counterfactual treatment outcomes over time in complex multi-vehicle simulation, In Proceedings of the 30th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM SIGSPATIAL 2022), vol. 7, pp. 1-4, 2022. (Best Poster Award)
- H. Murakami*, T. Tomaru, C. Feliciani, Y. Nishiyama, Spontaneous behavioral coordination between avoiding pedestrians requires mutual anticipation rather than mutual gaze, iScience, 2022.
- K. Fujii*, N. Takeishi, K. Tsutsui, E. Fujioka, N. Nishiumi, R. Tanaka, M. Fukushima, K. Ide, H. Kohno, K. Yoda, S. Takahashi, S. Hiryu, Y. Kawahara, Learning interaction rules from multi-animal trajectories via augmented behavioral models, Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS'21), 34, 11108-11122, 2021.

研究項目 A02 牧野班「遠隔触覚刺激・二次元通信を用いた行動介入基盤の開発と行動予測に基づく動作解析」

- G. Arakawa, R. Hirai, S. Suzuki, T. Kamigaki, Y. Makino and H. Shinoda, "Two-Dimensional Remote Actuation of Centimeter-Scale Objects with a Concave Bottom Using Airborne Ultrasound," in IEEE Access, 2024.
- Z. Xu, G. Arakawa, A. Nose, M. Fujiwara, Y. Makino, H. Kohsaka, Flexible physical intervention to fly larval locomotion using an ultrasound phased array device, Neuro2024. (7月発表予定)
- Q. Zhu, A. Wang, S. Tanaka, Y. Matsunami, Y. Makino, H. Shinoda, "Design of Haptic Experience Recording for Guide-dog Training," IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2023.
- 野田聡人, フレキシブルコイル間の Parity-Time 対称ワイヤレス電力伝送, 電子情報通信学会短距離無線通信研究会, 2023. (優秀ショートプレゼン賞)
- 小野悠太, 鈴木颯, 牧野泰才, 西海望, 篠田裕之, "超音波空中浮遊における高速カメラを利用した動的物体の制御," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023. (JSME ROBOMECH 表彰 (学術研究分野), JSME 若手優秀講演フェロー賞)
- 古謝勝将, 増田祐一, 牧野泰才, 篠田裕之, "バイオロギングのための磁気共鳴無線給電システム," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023. (JSME 若手優秀講演フェロー賞)
- Y. Makino, T. Takei, Y. Niida, S. Tawada, Y. Matsunami, H. Shinoda, Analysis of Concentration of Guide Dogs from Training Behaviors, SICE Annual Conference 2022, pp. 1363-1368, 2022.

研究項目 A02 川嶋班「データ駆動型 Swarm-Machine インタラクション技術の創出」

- T. Niizato*, Y. Nishiyama, K. Zempo, Y. Koike, K. Arai, The effect of group size and task involvement on temporal binding window in clap perception. Front. Psychol. 15:1355586, 2024.

- K. Sugimoto*, K. Ushio, R. Sugimori, E. Fujioka, H. Kawashima, S. Hiryu, H. Habe, Detection and Tracking of Flying Small Bats under Complex Backgrounds, The 29th International Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2023), 2023
- H. Kawashima*, Estimating Networks of Interaction in Fish Schools with a Minimal Model, 2nd International Workshop on Behavior analysis and Recognition for knowledge Discovery (BiRD) in IEEE The 21st International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2023.
- T. Niizato*, H. Murakami, T. Musha, Functional duality in group criticality via ambiguous interactions, PLoS Computational Biology, 19, 2: e1010869, 2023.
- T. Niizato*, Y. Nishiyama, K. Sakamoto, T. Kazama, T. Okabayashi, T. Yamaguchi, The ambiguous feeling between “mine” and “not-mine” measured by integrated information theory during rubber hand illusion. Sci Rep 12, 18002, 2022.

公募研究

- H. M. Yamanouchi, A. Kamikouchi, R. Tanaka*, Protocol to investigate the neural basis for copulation posture of Drosophila using a closed-loop real-time optogenetic system, STAR Protocols, 4, 2023.
- H. M. Yamanouchi, R. Tanaka* & A. Kamikouchi*, Piezo-mediated mechanosensation contributes to stabilizing copulation posture and reproductive success in Drosophila males, iScience, 26, 2023.
- S. Tezuka, M. Tanaka, T. Naganuma, K. Tochigi, A. Inagaki, H. Myojo, K. Yamazaki, M. Allen, S. Koike*, Comparing information derived on food habits of a terrestrial carnivore between animal-borne video systems and fecal analyses methods, Journal of Mammalogy, 104, 184-193, 2023.
- S. Baek*, A. Shimazaki, A. Zedrosser, T. Naganuma, C. Kozakai, K. Yamazaki, S. Koike, Response to human-modified landscape of an apex consumer: Sex- and season-related variations in road selection and movement pattern, Global Ecology and Conservation, 46, e02603, 2023.
- M. Ogawa*, S. S. Kimura, Variations in echolocation click characteristics of finless porpoise in response to day/night and absence/presence of vessel noise, Plos One, 18, e0288513, 2023.
- Y. Mishima*, I. Matsuo, Y. Karasawa, M. Ishii, T. Morisaka, Directional and amplitude characteristics of pulsed call sequences in captive free-swimming Pacific white-sided dolphins (*Lagenorhynchus obliquidens*), Journal of the Acoustical Society of America, 154, 2974-2987, 2023.
- L. Uesaka*, Y. Goto, M. Naruoka, H. Weimerskirch, K. Sato, K. Q. Sakamoto, Wandering albatrosses exert high take-off effort only when both wind and waves are gentle, eLife, 12, RP87016, 2023.
- T. Maeda*, S. Yamamoto, Drone observation for the quantitative study of complex multilevel societies, Animals, 13, 1911, 2023.
- S. Shigaki*, Y. Yoshimura, D. Kurabayashi, K. Hosoda, Palm-sized quadcopter for three-dimensional chemical plume tracking, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 71, 1-12, 2022.
- J. Brooks*, S. Yamamoto*, The evolution of group-mindedness: comparative research on top-down and bottom-up group cooperation in bonobos and chimpanzees, Current Opinion in Behavioral Science, 47, 101205, 2022.
- 吉仲瑞貴, 櫻間 一徳, 機械学習による回帰モデルを用いたマルチエージェントシステムの移動軌跡による分類, システム制御情報学会論文誌, 37, 22-30, 2024.
- T. Mishina, M. C. Chiu, Y. Hashiguchi, S. Oishi, A. Sasaki, R. Okada, H. Uchiyama, T. Sasaki, M. Sakura, H. Takeshima, T. Sato*, Massive horizontal gene transfer and evolution of nematomorph-driven behavioral manipulation of mantids, Current Biology, 33, 4988–4994, 2023.
- S. E. Lee, K. Shibata, S. Nonaka, S. Nobuhara, K. Nishino, Extrinsic Camera Calibration From a Moving Person, IEEE Robotics and Automation Letters, 7, 10344–10351, 2022.

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、計画研究及び公募研究間の連携体制

本領域は、領域代表の卓越した指導力のもと、計画班代表者がキープレーヤーおよび推進力として機能し、「階層的生物ナビ学」を創出する意思を共有した公募班と刺激を与え合うことで、大いに活気づいてきた。領域では、サイバーとフィジカルの両空間を往来しながら、階層ナビゲーションを深く理解し、世界に誇れる成果を挙げるための人材を結集している。合計9の計画班と第1期16、第2期20の合計36の公募班がこれまで設けられており、主に実世界の計測と検証を行うフィジカル班と、個体や集団の時空間的な動きを予測し制御するサイバー班の2つに分類されている。両班は密に連携し、フィジカルとサイバーのどちらにも取り組める体制を整備した。

フィジカル班(A01)は、様々な生物の階層的な移動をバイオリギング技術等で計測し、数理・統計モデルやシミュレーションを駆使して個体や集団レベルでの行動戦略を解明している。サイバー班(A02)では、数理(ルール)モデルから、統計・機械学習モデルに至るまでの幅広い行動データ分析に取り組むほか、動物行動観測や介入装置の開発・制御など、階層ナビゲーションの理解に不可欠な技術的サポートをソフトウェアとハードウェアの両面から推進している。R4年度に16件、R6年度に20件の公募班が加わったことにより、A01班では陸上・水中の大型哺乳類や長距離ナビゲーションのウミガメなどの研究に加え、モデル生物を用いた神経活動の解析も拡充され、神経科学から生態学まで幅広い研究環境が整っている。オンラインプラットフォーム slack を活用することで、総括班および計画班メンバーと同様に、公募班代表者も領域運営に関する情報を把握し共有できている。

現在までに領域内共同研究のテーマ数は41にのぼる(計画班間24、計画班と第1期公募班17)。特に計画班と公募班の連携については、サイバー班からフィジカル班への技術提供はもちろん、フィジカル班同士でも学生や若手研究者を介した研究手法の共有や指導なども精力的に展開されている。共同研究による論文公表件数は9件であり、特に公募班との共同研究は多くが継続中であり、今後さらに研究班間の連携を深めることで、融合的研究成果が挙げられるものと期待される(図8-1)。

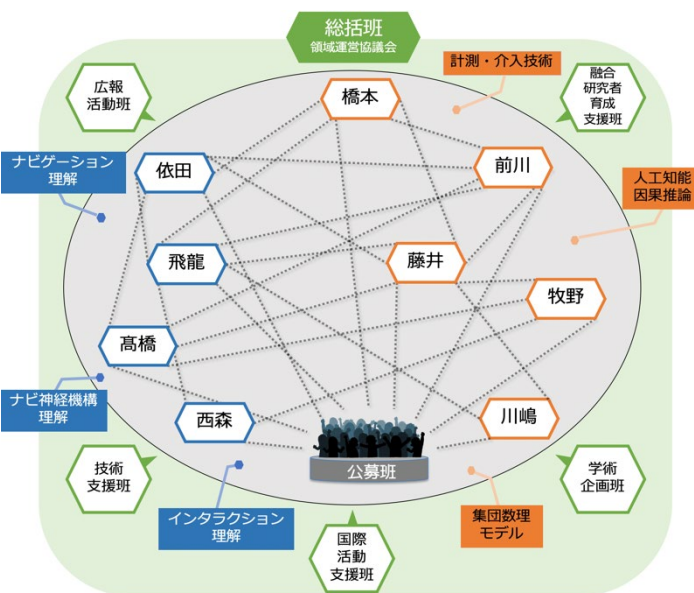


図8-1 これまでに行われた共同研究を表すネットワーク図
(具体的な内容は「6. 研究の進展」に記載)。「弟子入

(2) 連携を推進するための活動の実施状況

公募班と計画班の連携を組織的に推進するために、総括班として「技術支援」「融合研究者育成支援」「学術企画」「国際活動支援」の領域支援体制を組織した。

技術支援: χ ロボットやデータ分析技術を公募班に提供した(P14 参照)。

融合研究者育成支援: 班や専門を跨いだ異分野弟子入り制度を柔軟に活用できるよう、費用を支援し融合研究を加速させた(弟子入り述べ人数 55 名、回数 31 回)。また、大学間を移動しながら分野横断的なデータ解析を行う遊牧型ポスドクを雇用し(のべ3人)、次世代研究者の育成に取り組んだ。

学術企画: 2回の領域会議のほか、コロナ禍明けの対面交流会を2回(参加者計144名)開催した。領域会議では、サイバー班の持つ技術の展示を行い、技術共有を促進した。さらに、毎月の勉強会を計23回実施し(発表件数65件、のべ参加人数、957名)、計画班と公募班双方から若手とシニア研究者が登壇した。特に、サイバー班が実習形式で深層強化学習の話題を提供し、フィジカル班が研究ニーズを紹介するなど、領域内連携を加速させる契機を提供した。このほか、学会等での後援やオーガナイズドセッションの企画も7件行った。

国際活動支援: 若手研究者の国際活動の支援を計11件(北米、独国、中国、ザンビア)実施した。さらに、国際コンペティションを2回開催した(OpenPack Challenge 2022 参加者106名、Fish Tracking Challenge 2024 参加者9名)。

9 若手研究者の育成に係る取組状況

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（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

本研究領域では、主にポスドクとして研究に従事する研究者を若手研究者として定義し、

1. 若手研究者の国際派遣のサポート
2. 研究領域内での複数研究室に所属して研鑽を図る「遊牧型ポスドク」や「短期弟子入り」
3. 領域内研究者による、研究に必要な技術についての勉強会

という3つの観点で若手研究者の育成に取り組んだ。

1. 若手研究者の国際派遣サポート

これまでに、若手研究者の国際研究活動を支援するため、以下の地域への国際派遣を11件実施した。

令和4年度:7件（独・コンスタンツ2か月、ザンビア14日、北米・アトランタ5名）

令和5年度:4件（北米・アラスカ14日、北米・シアトル10日、中国・香港14日、北米・シアトル5日）

それぞれの地域での研究や、その地域の研究機関との共同研究などが実施された。これらの派遣をきっかけに、階層的生物ナビ学に関する国際的な研究ネットワークの強化・拡大が図られた。

2. 研究領域内での複数研究室連携

「遊牧型ポスドク」として、以下の3名がそれぞれ異なる研究室の教員の指導のもとで研究を行った。

- ・藤岡慧明（A01 飛龍班→A02 橋本班）
- ・王安晟（A02 牧野班→A02 藤井班）
- ・伊藤真（A02 藤井班→A02 川嶋班）

藤岡氏については、共同研究の形で、A02 前川班（ザンビアでの研究で利用した装着型 χ ログボット）、A01 依田班（バイオリギング技術）、A02 川嶋班（群飛行の3次元座標算出、および音声分類のための機械学習）とも研究を行っており、領域内の横断的な研究を推進している。

またこれとは別に、技術習得のために領域内で短期に他の研究室に訪問する、「短期弟子入り」も行い、計画班、公募班合わせて53件の技術共有が行われた。サイバー班の若手研究者に対して、フィジカル班の野外フィールドに実地参画する場も提供している。

3. 領域内研究者による、研究に必要な技術についての勉強会

領域発足時より、1ヶ月に一度の頻度で、Zoomによる勉強会を行っている。それぞれの研究紹介を行うような勉強会の他に、具体的なツールの使い方について講習する機会も設けており、若手の研究支援のサポートとして機能した。具体的には以下のような講習を行った。

- ・複数個体のモーショントラッキング技術の基礎とその利用
- ・動物実験における倫理的な課題の共有と議論
- ・計測や介入に利用する各種ハードウェアの特徴と利用方法
- ・群れの数理モデルについての基礎
- ・Google Colaboratory を用いた深層強化学習の実習

特に、生物研究者が容易にツールを利用できるようにという観点で、情報科学分野の最新の知見を共有し、いくつかの技術について具体的にそれを利用できることを目指した。また、勉強会の後にはオンラインでの懇親の機会も設け、若手研究者とシニア研究者との交流を図った。この交流会をきっかけに始まった若手研究者との共同研究もあり、領域内の若手の育成の観点で重要な機会となっている。今後は領域内での若手育成に加えて、勉強会の活動も含めた英語教科書の出版などを通して、幅広い分野での若手研究者の育成と階層的生物ナビ学の普及を図る。

【以下、非公開部分】（該当無し）

10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域においては、「階層的ナビ学」の重要性を一般市民に広く啓蒙し、裾野の拡大を行うことが領域の発展に繋がると考え、ホームページの充実、公開セミナー・講演会、及びプレスリリースの実施など、多岐にわたる取り組みを積極的に展開してきた。まず、領域の設立と同時にホームページ (<https://bio-navigation.jp>) を立ち上げ、常に最新の情報を更新し続けている。ホームページでは、セミナーや講演会、シンポジウムなどのイベント告知や、プレスリリース・メディア掲載、論文発表や受賞などのさまざまな活動を発信・報告している。

さらにニュースレターを定期的に発行し、HP上でPDFにて公開している(図10-1)。ニュースレターでは、計画研究や公募研究で行われた最新の研究成果や、学生・若手研究者の勉強会等のイベント参加報告、領域イベント開催報告、国際学会参加報告や、他の研究室への弟子入り体験記など、領域での取り組みや活動がまとめられており、一般向けに分かりやすく紹介している。

プレスリリースに関しては、自己満足に陥ることなく、細部にわたる注意を払いつつ丁寧に作成している。例えば、インタープリターのな人材(博士号を有するイラストレーター)に依頼して、研究内容を明快に伝えるイラストを作成してもらうことで、一層理解しやすく、自己完結しない内容を実現している(例えば、https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/upload/20221024_env.pdf)。A01高橋班やA01依田班は、渡り鳥の脳内にあるコンパス細胞を発見し、テレビ、新聞、国内外のネットニュースなど、国内外の多くのメディアで取り上げられた。A01依田班は、航空工学的解析により、史上最大の翼竜であるケツァルコアトルスが実際には飛ぶことが苦手であったという新仮説をプレスリリースし、国内外のメディア、X、Wikipediaなどで拡散された。ネット上での情報拡散を示すAltmetricではトップ5%(64160位/25880948論文中)を記録した。A02藤井班は、機械学習を用いて群れやスポーツなどの集団行動を分析する手法や取り組みについてプレスリリースを行った。プレスリリースの原稿作成は数時間~数十時間に及ぶ作業であるが、市民に対して適切かつ質の高い情報を提供することを最優先に、これからも継続して注力していく。

また、計画班の代表者はセミナーや公開講座の開催を積極的に行い、単なる一方的な情報の伝達に終わらせないよう、双方向のコミュニケーションを確立するための工夫を積み重ねてきた。例えば、A01飛龍班では、女子中高生向けのコウモリの見学会や模擬講義などを毎年実施している。

領域で得られた成果を社会に定着させるため、本領域で得られたバイオリギングデータのデータベース登録を進めている。バイオリギングデータベースBiPでは、鳥類から得られたGPSデータを登録することで、鳥の飛行行動から推定された風向・風速がA01依田班の手法(Goto, Yoda et al. Sci. Adv. 2017)を用いて自動的に推定される。バイオリギングデータや、推定された風向・風速は誰でも利用可能で、気象学者がデータ同化に用いて台風の予測精度の向上が図られたり、動物園や水族館の展示に用いられたりしている。また、成果の社会還元として、本領域で得られた成果をもとに特許を出願し、産業化への貢献を積極的に図っている(伊東、鏡、橋本他「3次元形状計測方法及び3次元形状計測装置」、特開2023-083632)。

本研究領域で行われたアウトリーチ活動の件数は以下の通りである。

- ・プレスリリース18件(計画班14件, 公募班4件)
- ・メディア掲載件数112件(計画班103件, 公募班9件)
- ・一般向け講演会・セミナー20件(計画班10件, 公募班10件)
- ・ニュースレター・広報誌・展示・パンフレット16件(計画班11件, 公募班5件)
- ・小・中・高校生向け授業・実験6件(計画班6件)



図10-1 ニュースレター



図10-2 若手研究者個人(A01依田班・井上特任助教)をフィーチャーした新聞記事。領域活動を広く国民に知ってもらうため、領域の若手も丁寧な取材対応を心がけている

11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、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1頁以内で記述すること。

総括班には R3 年度に 520 万円、R4 年度に 1610 万円、R5 年度に 1810 万円の予算を配分した。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(401 万円): (a) 領域運営会議: 計画班代表者を中心に、3 年間で 27 回開催した。うち 3 回は対面で実施した。会議室使用料等に予算を使用した。(b) 領域会議: 計画班と公募班が一同に会する会議を R4 と R5 年度にそれぞれ 1 回開催した。R4 はオンラインイベントとして開催し、口頭発表 25 件が行われ、約 90 名が参加した。R5 は口頭発表 24 件、ポスター発表 54 件が行われ、約 80 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。(c) 国際シンポジウム: 海外からそれぞれの分野の著名研究者を招いた国際イベントを開催した。口頭発表 14 件(うち 4 件は招待講演)、ポスター発表 41 件が行われ、83 名が参加した。招待講演者の旅費、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) その他のイベント: 対面研究発表イベントを 2 回開催し、1 回目は 36 件の発表と 77 名のオンライン参加があった。2 回目は 7 件の 31 名の対面参加があった。会場利用料に予算を使用した。技術的支援(877 万円)。(a) A02 フィジカル班: 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。(b) A02 フィジカル班: ナビデータ分析のための共用計算機サーバの購入に予算を使用した。
- (3) 次世代研究者育成支援(1375 万円): 遊牧型ポスドクを雇用(のべ 3 人)し、人件費に予算を使用した。
- (4) 国際活動支援(700 万円): 若手渡航支援・国際コンペティション渡航支援: 若手研究者の国際活動支援および国際コンペ上位入賞者の渡航支援を計 11 回実施した。渡航に関わる旅費などに予算を使用した。
- (5) 広報活動(HP、紹介冊子、アウトリーチ)(175 万円): (a) 領域 HP: <https://bio-navigation.jp> 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。(b) ニュースレター: 毎年 2 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 から No.5 までを公開した。



図11-1 国際シンポジウムでの集合写真。領域内外から集まり、階層ナビについて活発な議論を交わした

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: 高解像度カメラ一式(Illuniss 社カメラ CMV65, 4 台)(693 万円)(西森班、明治大) / 研究用倒立顕微鏡システム一式(ニコン TS2R-FL 本体セット+デジカメ DSFi3)(310 万円)(西森班、産業技術総合研究所) / 大容量メモリ計算サーバー(Apple 製 MacPro Z0W3, メモリ 1.5TB)(389 万円)(川嶋班、筑波大) / 自動変形迷路一式(小原医科産業株式会社製、カスタム仕様)(656 万円)(高橋班、同志社大) / 地磁気キャンセラーコイル(日本ユニバーサル電気株式会社製、移設可能)(246 万円)(高橋班、同志社大) / 空間高精細トラッキングキャプチャ同期システム(OptiTrack PrimeX41, 8 台 他一式)(1100 万円)(飛龍班、同志社大) / GPU ワークステーション(アプライド, 2 台)(290 万円)(橋本班、東北大)

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、オープン講義等)も多数あることも明記したい。

12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、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、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

装着型/環境型 χ ロボットを核としたシームレス CPS の導入により、フィジカル班(A01)とサイバー班(A02)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。令和6年度以降は新しい公募研究や領域外の研究者も含めこの共同研究ループを拡張、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) χ ロボットの発展

好奇心を備えた装着型 χ ロボットのさらなる展開: 本領域のこれまでの研究活動により、装着型 χ ロボットは人工知能の好奇心に基づいて希少な映像撮影を行う機能を備えた。計算リソースの貧弱な装着型 χ ロボットで実現するため、普段とは異なる事象の発生への興味を人工知能の好奇心と定義し、異常検知手法によって自動的に検出された希少なイベントを撮影する。提案した機能の有効性は A02 前川班と A01 依田班とのオオミズナギドリを対象とした実験にて確認された。今後は公募・計画班が研究対象とするツキノワグマや他の海鳥類に展開し、その有効性を検証する。

介入機能の発展: 介入機能とは特定の条件が生じたとき、ロボットが動物になんらかの介入を行う機能である。これまでの研究活動において、装着型 χ ロボットに音声介入装置を実装した。A02 前川班と A01 依田班とのウミネコを対象とした大規模な介入実験により、ウミネコの現在の状況に応じた適応的な介入を行えることを確認した。今後は、磁気などの他のモダリティを用いた介入機能の実装を行う。また、環境型 χ ロボットに、好奇心を備えた人工知能(強化学習)を搭載し、A02 前川班と A01 高橋班でマウスを対象に介入実験を行い、頻度の低い行動を引き起こす介入を能動的に行っていることを確認した。現在の手法は単一のモダリティにしか対応できないため、マルチモーダルな介入を行えるように改良するとともに、他の動物種への展開も行う。

(2) 行動モデル化技術と介入・計測方策決定技術の発展

本領域では、これまで階層ナビゲーションにおける行動ダイアグラムの理解・解明に繋がる行動モデル化について、計測によって得られた各種センサ情報から、数理モデリングや機械学習を用いて行ってきた。今後は、解釈性の高い数理モデルと表現力の高い機械学習モデルの適切な融合方法や、複数の生物種のデータを用いて一般化された行動モデル化手法の構築を目指す。

また、モデル化の結果を検証した後に、得られるモデルをより精緻化したり、仮説を検証、または新たな行動を創発したりするために、研究者がフィジカル研究における介入・計測の方策を決定する必要がある。本領域では、その検証方法の1つとして、介入の効果を正確に検証するための時空間因果推論技術の開発を行った。今後は、フィジカル空間では計測困難な行動もサイバー空間においてシミュレートし、検証することで、介入や計測の方策を決定できる手法の構築を目指す。

(3) 生態学と神経科学の発展

生態学と神経科学の融合: 装着型 χ ロボットの開発により、野外動物の移動行動と神経活動の因果関係の理解が可能になって来たこと、また環境型 χ ロボットの開発により、実験室内においてリアルタイムに動物行動の状態推定と環境パラメータの操作が同時に可能になり、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。

階層ナビゲーションにおける AI 駆動型科学の確立: 現代科学における AI の導入は、多様な学問領域に革新をもたらすことが期待されている。ただし、生物の多個体インタラクションを含む階層ナビゲーションという複雑な現象においては、計測可能なデータの不十分さや生物を扱うためのモデル化の困難さなどの理由により、AI

駆動型科学の潜在能力は十分に発揮できていない。本領域では、センシング・ロボット技術と数理モデル化・機械学習技術を融合することで、群れの社会的相互作用の階層的でダイナミックな構造や機能を分析することになり、最終的には「計測→分析・モデル化→介入方策の決定→介入」の自動化を目指す。現状はこれらのプロセスの一部分の自動化に成功した段階であるが、今後はより精錬化されたモデル化やより多くのプロセス自動化により、従来の研究者の試行錯誤に頼る方法から脱却し、より深い生物学的洞察を得ることを目指す。

（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装着型 χ ログボットは、すでに公募班に貸し出しているが、より多くの班に提供する体制を整備する。そのため、一部の大型動物には現状の χ ログ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。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(A01)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

(https://drive.google.com/drive/folders/12p32vAbdOUosGOUWvnCGMnahByGnJwvq?usp=drive_link)。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(<https://open-pack.github.io/challenge2022/>; <https://ftc-2024.github.io>)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、A01 では、生物のナビゲーションに関連する様々な科学分野からの応募を期待し、特に、高度なナビゲーション能力を持つ生物の個体・集団レベルの移動パターンを解析し、その数理モデルを構築できる研究者を求めた。A02 では、ナビゲーションの計測や分析に必要な先進的な工学技術や情報科学技術、特に χ ログボットの開発や適用に貢献できる技術力を持つ研究者を求めた。具体的な公募研究者像を以下のように設定し、重点的な補充を行った。

A01 における期待する公募研究者像：[1] 動物の階層ナビゲーションに関する先進的な数理モデルの構築能力を有している。[2] 環境や生体内情報と行動の関係を解明するための介入実験に豊富な経験がある。[3] χ ログボットなどのナビゲーションデータ共有・分析技術に熟知し、領域内の他の研究者と積極的に連携する意欲がある。

B01 における期待する公募研究者像：[1] 階層ナビゲーションの計測や分析に関する革新的な工学・情報科学技術を有している。[2] χ ログボットの開発や適用に関する技術的知見を持ち、これを通じて生物のナビゲーション研究に貢献できる。[3] 生物学や異分野との共同研究経験があり、ナビゲーション研究における異分野融合の推進に意欲的な参加する意図がある。

（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本学術変革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(2022年01月に本領域と明治大学先端数理科学インスティテュートと国際会議 ICMMA2021 を共催/2023年03月に IEEE 国際会議 PerCom にてワークショップ BIRD 開催/2024年03月に本領域主催の国際シンポジウム開催など)。さらに、2024年09月に、国際シンポジウム SWARM 2024 において、本領域でセッション開催を予定している。今後も、これまでに培ってきた海外拠点との緊密な連携を礎とし、国際ネットワークの一層の拡張及び階層的生物ナビ学の普及に努めていく。

以上、中間評価までの取り組みを契機として、生物学と情報学が交錯する「階層的生物ナビ学」という新たな領域を拓き、さらに未踏の研究動向を育成していく。

13 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。

小林 亮（広島大学名誉教授）

生物が持つ高い能力にわれわれはしばしば驚かされる。生物、とりわけ動物にとって生き残りをかけた重要な行為の一つに、ナビゲーションがある。このナビゲーションの仕組みを理解するには、実験と理論双方によるアプローチが欠かせない。この魅力あふれる生命現象に対して、本学術変革領域研究(A)「階層的生物ナビ学」では従来のアプローチに先端的な情報学をさらに加えることで、実世界とデータ世界を繋ぐ革新的な研究方策を提案し、個体から集団へと階層ナビゲーションの行動原理の解明に迫る、大変重要な研究に取り組んでいる。特に本領域では、個体のナビゲーションとその上位層となる集団ナビゲーションに関わる各要素、そしてそれら関係を、行動ダイアグラムという概念を定義することで明確化し、実世界での実験を担当するフィジカル班と、数理モデルや機械学習によるデータ分析を担当するサイバー班との連携によって、学術変革領域にふさわしい独創性、挑戦性の高い融合研究を切り開いている。

これまでの3年間において、フィジカル班とサイバー班との連携も非常に活発に展開されており、ユニークな研究が複数立ち上がっていると同時に、融合研究の一部の成果はすでにインパクトの高い Science Advances や NeurIPS などに発表されている。また例えば海鳥とヨットレースの移動経路に関する力学モデルの類似性を発見した研究が PNAS に発表されるなど、個別研究においても生物のナビゲーションに関するモデル研究の成果が顕著に出ており、中間評価に至るまでの第一段階として、当初の計画以上に順調に研究が進展したと評価出来る。

生物のナビゲーションには、生物のしなやかさや賢さを知る非常に重要な問題であり、未だ多くの謎が残っている。本領域が提唱する革新的な研究フレームワークと異分野融合によって、今後のさらなる研究の発展が強く期待される。本領域の研究は、生物のナビゲーションに関する理解を飛躍的に深化させると同時に、他の関連分野にも大きな影響を与える可能性がある。例えば本領域では、ロボティクスやAIの分野において、生物のナビゲーション戦略を応用することで、より高度な自律システムの開発が行われている。また、生態学や進化学においても、本研究の成果は新たな視点を提供し、生物の適応戦略についての理解を深める一助となるだろう。

荒井修亮（京都大学名誉教授、東南アジア地域研究研究所・連携教授、フィールド科学教育研究センター・特任教授：海洋生物環境学、水産学）

学術変革領域研究(A)「サイバー・フィジカル空間を融合した階層的ナビゲーション」は新学術領域研究「生物ナビゲーションのシステム科学」（以下、前領域）の成果を基に、その発展形として研究目的と全体構想が練られている。このため、前領域ではログボットなどセンサとメモリを融合させた「バイオロギング」を実際のフィールドにおいて人間を含む動物（線虫からクジラに至る）の行動を計測することが主な目的であったが、本研究では、バージョンアップされた「 x ログボット」を駆使するとともに、動物たちの行動を直接制御する新たな手法による介入実験が大幅に増えている。その結果として、得られた様々な膨大な動物行動の時系列データを解析・解釈するために、サイバー空間での再現を行うシームレス CPS を導入することによって、理論的なアプローチが可能となってきたところに大きな進歩を感じる。

前領域ではクジラへのロガー装着とその方法（ドローン）に驚いたが、今回はアリへの RFID タグの装着ならびに信号の受信距離の拡大（2 mm→1 cm）に技術の進歩を感じた。その他、さまざまな技術の進歩が垣間見えるので、中間評価を踏まえての後半の研究の展開が楽しみである。

また研究に参画している若手研究者の育成の方策（弟子入りと遊牧型ポスドク）もユニークであり、次の世代を担う彼らの研究へのモチベーションの活性化に大きく貢献していると思う。

特に研究期間の大半が新型コロナ禍によって、海外出張や対面での活動が制約されていたにも拘わらず、多くの論文が発表されていることは評価できる。これは偏に領域代表を始め、計画班代表者の指導力によるものと考えられる。

有村博紀（北海道大学大学院情報科学研究院・教授:情報科学、知能情報学）

本研究領域は、個体活動から集団活動レベルまで生物の移動に関わる諸問題を、新しい概念「階層ナビゲーション」のもとで一貫して包括的に扱い、解決することを目的とした、新しい学問分野「階層的生物ナビ学」の創出を目指すものである。とくに先行領域におけるバイオリギングを援用した移動生物学を一段と進化させ、バイオリガーに代表される実世界のセンシングと、AI に代表される情報世界（データ世界）の情報処理をシームレスに融合することで、個々の生物や移動体のナビゲーションから多数の個体間の相互作用までを一貫して扱うための新しい枠組みの確立をねらっている。情報学からは、実世界と情報世界から生成される膨大なデータに基づいて、人と社会の活動を支える知識基盤確立が喫緊の課題だが、本領域の成果は、これに対する一つの回答となり得る。

「階層ナビ学」の創出には、フィールド研究者（生物・生命学者）と情報技術者（情報学者）の分野の枠を超えた越境的研究が必要であるが、生物学の要求（希少行動の検出、センサーの長寿命化）を踏まえた、情報科学からの先端技術（AI 技術、機械学習、介入技術）を援用した知的かつ省エネなバイオリガー（カイログボット）の開発や、生物学と情報学からなる計画班と、多様な研究対象から採用した公募班からなる異分野連携体制を活かして、活発かつ効果的な融合研究を実現している。研究成果は、PNAS や NeurIPS などトップ雑誌・トップ国際会議を含む、多数の優れた学術論文として発表されている。加えて、広範な研究領域をカバーする融合的な研究推進のための工夫として、班と専門をまたいだ「異分野弟子入り制度」や「遊牧型ポスドク制度」などの融合研究者育成支援のための工夫がされている。サイバー班が持つセンサーやデータ処理技術の展示会、計画班と公募班、若手とシニア研究者が出会う勉強会の継続的実施（毎月 1 回、20 数回実施）、新学問分野周知のための学会開催やセッション企画、若手の国際活動支援なども活発に行われており、「階層的生物ナビ学」の創出に向けて、研究を効果的に推進していると評価する。

今後研究計画後半を迎えての、情報学からの野心的な期待として、本研究領域の研究と技術が可能にした、大量のナビゲーションデータの収集、蓄積、解析手段を、さらに個々の研究対象を超えて発展させ、上位の階層で統合的に活用し、社会・科学における移動と集団のインタラクションを解明・利用するための社会情報基盤の構築方法を明らかにすることが望まれる。計画前半の研究でも、生物学を対象とした先端ロギング解析技術を、社会における交通・人流の解析・誘導へ適用する萌芽的な研究成果も示しており、今後研究の進展を期待する。