

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和3年度事後評価用〕

令和3年6月30日現在

機関番号：11301
 領域設定期間：平成28年度～令和2年度
 領域番号：4803
 研究領域名（和文）生物ナビゲーションのシステム科学
 研究領域名（英文）Systems Science of Bio-navigation
 領域代表者
 橋本 浩一（HASHIMOTO Koichi）
 東北大学・情報科学研究科・教授
 研究者番号：80228410
 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,087,100,000円

研究成果の概要

本領域では、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ことをめざして、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データ解析技術を開発し、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目指した。

5年間の領域設定期間において、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データ駆動型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。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。

研究分野：ロボティクス

キーワード：制御工学 データ科学 生態学 神経科学

1. 研究開始当初の背景

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

2. 研究の目的

上記の背景のもと、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した。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標とする新たな学問領域(図1)の創設を目指した。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した。

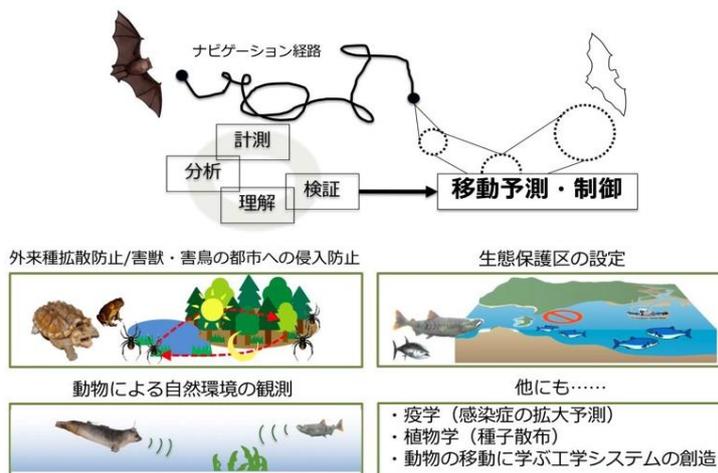


図1 ナビゲーション研究の概要

3. 研究の方法

本領域では、世界的に見ても例がない体系的なシステム科学的アプローチ(図2)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・解明に取り組んだ。以下にその概要を述べる。

(1) ナビ計測: 先端センサやロガーでヒトや動物の移動、環境情報、体内情報を同時かつ多次元に計測する。GPSにより測定

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

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

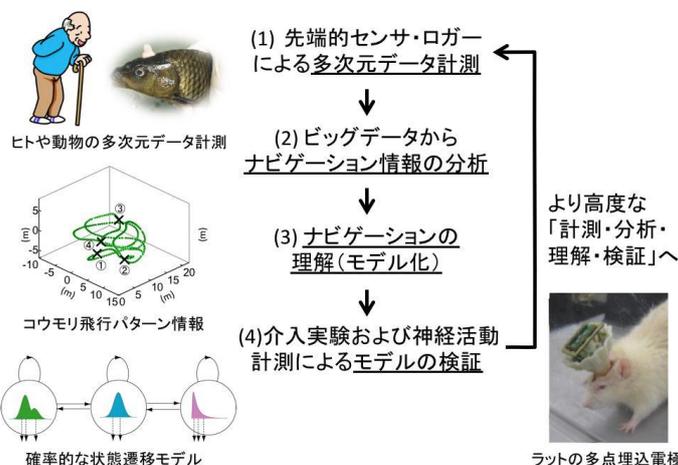


図2 生物ナビゲーションのシステム科学

するかによって検証できる。また、数理モデルに対応する神経活動が発見されれば、脳が数理モデルと同様の情報処理を行っていたという証拠になる。これらを明らかにするために、(i)動物の移送などによるナビゲーションへの野外介入実験、(ii)ナビゲーション中の実験室内動物への電気生理学および光遺伝学的な神経活動介入実験、および(iii)ナビゲーション中の実験室内動物の大規模神経活動計測による数理モデルとの対応解明、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。)

4. 研究の成果

【研究項目 A01 制御工学】

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

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

【研究項目 A02 データ科学】

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

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

【研究項目 B01 生態学】

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

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

【研究項目 B02 神経科学】

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

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

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

研究項目 A01

*Ardakani, I., Hashimoto K., Yoda K. (2019) Context-based semantical vector representations for animal trajectories. *Advanced Robotics* 33(3-4). 査読有
Abe, T., Kubo, N., Abe, K., Suzuki, H., Mizutani, Y., Yoda, K., *Tadakuma, R., Tsumaki, Y., (2021) Development of Data Logger Separator for Bio-logging of Wild Seabirds, *J. of Robotics and Mechatronics*, 33(3), 446-456. 査読有
*Iwatani, Y., Ogawa, H., Shidara H., Sakura, M., Sato, T., Hojo, M. K., Honma, A., and Tsurui-Sato, K. (2019). Markerless visual servo control of a servosphere for behavior observation of a variety of wandering animals. *Advanced Robotics*, Vol. 33, No. 3-4, pp. 183-194, 査読有.

研究項目 A02

Duy N.L.V., Sakuma T., Ishiyama T., Toda H., Arai K., Karasuyama M., Okubo Y., Sunaga M., Hanada H., Tabei Y., *Takeuchi I. (2020) Stat-DSM: Statistically Discriminative Sub-trajectory Mining with Multiple Testing Correction. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (TKDE)*. Early Access. 査読有
Duy N.L.V., Toda H., Sugiyama R., *Takeuchi I. (2020) Computing Valid p-value for Optimal Change-point by Selective Inference using Dynamic Programming. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS2020)*. 査読有
*Maekawa, T., ..., Koike, S., Miyatake, T., Kimura, K., Ogawa, H., Takahashi, S., Yoda, K. (2020) Deep Learning-assisted Comparative Analysis of Animal Trajectories with DeepHL, *Nature Communications* 11: 5316. 査読有
Korpela, J., ..., *Maekawa, T., Nakai, J., Yoda, K. (2020) Machine learning enables improved runtime and precision for bio-loggers on seabirds, *Communications Biology*, 3: 633. 査読有
*Tamaki, T., Ogawa, D., Raytchev, B., Kaneda, K. (2019) Semantic segmentation of trajectories with improved agent models for pedestrian behavior analysis, *Advanced Robotics*, 33(3-4):153-168. 査読有
*Hirakawa, T., Yamashita, T., Tamaki, T., Fujiyoshi, H., Umezu, Y., Takeuchi, I., Matsumoto, S., and Yoda, K. (2018) Can AI predict animal movements? Filling gaps in animal trajectories using Inverse Reinforcement Learning, *Ecosphere*, 9(10):e02447, 査読有
* Okukubo T., Bando Y., Onishi M., Ando H. (2021) Foot Traffic Prediction for Large-Scale Events Based on Pattern-Aware Neural Regression, *AAAI-21 Workshop on AI for Urban Mobility*. 査読有

研究項目 B01

*Yoda, K., Okumura, M., Suzuki, H., Matsumoto, S., Koyama, S., Yamamoto, M. (2021) Annual variations in the migration routes and survival of pelagic seabirds over mountain ranges. *Ecology*, e03297. 査読有
*Fujioka, E., Fukushima, M., Ushio, K., Kohyama, K., Habe, H. and Hiryu, S. (2021). Three-dimensional trajectory construction and observation of group behavior of wild bats during cave emergence. *Journal of Robotics and Mechatronics* 33, 556-563. 査読有
*水谷友一, 鈴木宏和, 前川卓也, Joseph Korpela, 宮竹貴久, 越山洋三, 依田憲 (2021) 海上

飛翔中のウミネコによる昆虫捕食とその同定. 日本鳥学会誌 70, 53-60. 査読有

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

*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

*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

研究項目 B02

*Takahashi, S., Hombe, T., Takahashi, R., Ide, K., Okamoto, S., Yoda, K., Kitagawa, T., *Makiguchi, Y. (2021) "Wireless logging of extracellular neuronal activity in the telencephalon of free-swimming salmonids", *Animal Biotelemetry*, 9:9. 査読有

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

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

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

*Sato, M., Mizuta, K., Islam, T., Kawano, M., Sekine, Y., Takekawa, T., Gomez-Dominguez, D., Schmidt, A., Wolf, F., Kim, K., Yamakawa, H., Ohkura, M., Lee, M. G., Fukai, T., Nakai, J., *Hayashi, Y. (2020) Distinct mechanisms of over-representation of landmarks and rewards in the hippocampus. *Cell Reports* 32(1), 107864. 査読有
Hommaru, N., Shidara, H. Ando, N., *Ogawa, H. (2020) Internal state transition to switch behavioral strategies in cricket phonotaxis behavior. *Journal of Experimental Biology* 223, jeb229732. 査読有

Yamazaki, S. J., Ohara, K., Ito, K., Kokubun, N., Kitanishi, T., Takaichi, D., Yamada, Y., Ikejiri, Y., Hiramatsu, F., Fujita, K., Tanimoto, Y., Yamazoe-Umemoto, A., Hashimoto, K., Sato, K., Yoda, K., Takahashi, A., Ishikawa, Y., Kamikouchi, A., Hiryu, S., Maekawa, T., *Kimura, K.D. (2019) STEFTR: A Hybrid Versatile Method for State Estimation and Feature Extraction From the Trajectory of Animal Behavior. *Frontiers in Neuroscience* 13: 970. 査読有

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

*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

ホームページ等

<http://navi-science.jp>