

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04144

研究課題名（和文）生物の集団行動ダイナミクスの解明と自律分散型通信システムへの展開

研究課題名（英文）Analysis of dynamics in calling behavior of animals and its application to autonomous communication system

研究代表者

合原 一究 (Aihara, Ikkyu)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70588516

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では「生物の集団行動を自律分散型システムと捉えて実験的・数理的に研究し、その成果に基づいて高効率な通信方式を提案すること」を目的とした。まず、音声識別装置「カエルホタル2」の開発およびマイクロフォンアレイによる音源分離を通して、カエルや昆虫の発声行動における時空間パターンを分析した。次に、音声コミュニケーションと空間構造に基づく状態遷移を記述する数理モデルを構築し、実際の行動特性を定性的に再現した。最後に、提案モデルの拡張および数値シミュレーションによって無線センサネットワークの自律分散型制御への応用可能性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動物の集団発声行動における時空間パターンは、特に野外では未解明の点が多い。カエルや昆虫の発声行動はオスがメスを呼ぶという繁殖のための重要な役割を担っている。このような行動を先端的計測技術を用いて高精度に測定し、そのメカニズムを数理モデルとして抽出する本プロジェクトには「生物の新たな行動原理の解明」と「生物に学ぶ新しい技術開発」が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This project aims to examine nonlinear dynamics in calling behavior of animals both experimentally and theoretically and propose the novel methodology applicable to the autonomous distributed control of wireless sensor networks. First, we experimentally analyzed the spatio-temporal patterns in acoustic communication of animals. Second, we proposed a mathematical model in which animals switch their behavior depending on the communication and spatial structure. Third, we proposed the mathematical model applicable to the autonomous distributed control of wireless sensor network and examined its efficacy based on numerical simulations.

研究分野：非線形科学

キーワード：動物行動 数理モデリング 野外計測 通信方式 無線センサネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

IoT の広がりに伴い、多数の無線端末を対象とした自律分散型通信方式の重要性が高まっている。しかし、端末数の増大や端末特性の多様化が生じており、技術面でのブレークスルーが求められている。高密度下で高度なコミュニケーションを実現する生物の集団行動メカニズムを解明できれば、生物の高度なコミュニケーションに学ぶ新たな通信方式が提案できる。

2. 研究の目的

生物の集団行動を自律分散型システムと捉えて実験的・数理的に研究し、その成果に基づいて高効率な通信方式を提案する。生物には繁殖期に大集団を形成し、高密度下であっても良好なコミュニケーションを実現する種が存在する。本研究では、(課題 1)先端的音響計測システムによってこれらの生物の集団行動を計測し、(課題 2)状態遷移を伴う動力学モデルによって実験データの時空間特性を再現し、(課題 3)その動力学モデルによって大規模通信システムにおける通信時の高信頼性と低電力化を実現する。これにより数理情報学の観点から生物の集団行動ダイナミクスの理解を深めるとともに、IoT の基盤技術である無線センサネットワークの自律分散型制御に有用な通信方式を提案する。

3. 研究の方法

課題 1 では、音声可視化システムおよび無線センサネットワーク型マイクロフォンアレイシステムによって合唱構造を時系列データとして取得する。これらの計測手法については、すでにニホンアマガエルなどのフィールド調査に部分的に使用し、音源定位手法としての有効性を実証している。本研究では、上記手法をベースに周波数特性に基づく音源識別性能を強化した計測装置の開発や解析手法の拡張を実施し、室内実験と野外調査に応用する。これらのデータを分析し、生物の集団においてコミュニケーションの結果、自発的に形成していく空間構造および発声タイミングの同期特性を明らかにする。

課題 2 では、個体ごとの行動ルールを状態遷移を伴う動力学モデルとして記述し、空間配置に応じた集団での同期特性を数理的に研究する。まず、合原・小南・村田らによる先行研究 (Aihara et al., Royal Society Open Science, 2019) に基づいて、位相振動子モデルに基づく個体間相互作用や空間配置に応じて状態を切り替える数理モデルを提案する。さらに、数値シミュレーションや線形安定性解析に基づいて提案モデルの振る舞いを分析し、実験データと比較する。

課題 3 では、課題 2 の提案モデルを多数のセンサ付き無線端末の自律分散型通信方式に拡張する。まず、多数の端末が空間的に分布した状況を仮定し、提案モデルに基づく数値シミュレーションによって自発的に形成される時空間特性を、特に通信時の高信頼性と省電力性とのトレードオフの観点から調べる。さらに、実際の通信システムを想定したシミュレーションをおこない、その有用性を検証する。

4. 研究成果

課題 1 : 先端的音響計測システムによる合唱構造解析

特定の周波数成分に反応して明滅を繰り返す音声識別装置「カエルホタル 2」を開発し、野外調査に応用した。「カエルホタル 2」はマイクロフォンと LED に加えて、マイコンを搭

載しており、特定の周波数成分のみフィルタリングできる。本課題では、ニホンアマガエルとシュレーゲルアオガエルの2種による合唱をカエルホタル2を用いて分析し、それぞれの鳴き声を安定して識別できることを示した。次に、マイクロフォンアレイを用いた野外環境での計測実験と独立ベクトル分析によるデータ解析により、野外環境での音源定位および分離に成功した。これらの成果に基づき野外調査を繰り返し実施し、カエルの合唱特性に関する大規模データを取得した。

次に、音源分離技術および同期特性の分析技術を室内実験に展開し、カエル以外にスズムシ、セミといった昆虫の発声特性を分析した。その結果、周期的な発声を伴う行動状態と休止状態の遷移、2種の鳴き声の使用など、生物の発声行動おける共通点や差異を種横断的に観測した。また、これまでに得た生物の同期特性の研究成果に基づき、Michael D. Greenfield 博士、Vivek Nityananda 博士と連名で生物全般の同期特性のレビュー論文を執筆した。

以上の研究成果は2編の査読付き学術論文として発表したほか(論文1、2)複数の学会や研究集会で発表した。

課題2：空間構造を考慮した数理モデリング

近接個体との距離に応じて行動を変化させる数理モデルを構築した。具体的には、カエルや昆虫の発声行動で一般的に見られるサテライト行動に着目した。サテライト行動は、鳴いている他のオスの近くであえて黙って待機して、近寄ってくるメスを横取りする戦略である。サテライト行動をとる個体は消費エネルギーを抑えつつ、メスを獲得できるというメリットがある。本課題では、近接個体との距離および発声頻度の差に応じて状態遷移が駆動される数理モデルを提案し、その特性を数値シミュレーションによって分析した。その結果、サテライト行動への遷移がある場合には、全体の活性が自律分散的に分割されることで群れ全体のエネルギー消費を低減されうること示した。

また、これまでおこなってきた位相振動子モデルを用いたカエルの合唱研究についての成果に基づき、上述の Michael D. Greenfield 博士、Vivek Nityananda 博士と連名のレビュー論文の中で同期現象の数理モデルについて概説した。

以上の研究成果は2編の査読付き学術論文として発表したほか(論文2、3)複数の学会や研究集会で発表した。

課題3：無線センサネットワークにおける高信頼性に関する応用研究

課題2の提案モデルを拡張し、消費エネルギーを低減しつつ効率的にパケット衝突を避ける通信方式の構築を進めた。具体的には、提案モデルで導入した長時間の停止を実現するサテライト状態への遷移に加えて、パケット衝突のより効率的な回避のために相互作用の形状を網羅的に変化させる数値シミュレーションをおこなった。さらに、低消費電力かつ長距離通信を可能にする LoRaWAN への応用可能性を数値シミュレーションをベースに検証した。

以上の研究成果は、現在投稿論文として準備を進めているほか(論文4)提案モデルのベースになった論文3で応用可能性のアイデアを紹介した。

論文1 : Awano, H., Shirasaka, M., Mizumoto, T., Okuno, H. G., & Aihara, I. (2021). "Visualization of a chorus structure in multiple frog species by a sound discrimination device." *Journal of Comparative Physiology A*, 207, 87-98. (課題1の成果)

論文2 : Greenfield, M. D., Aihara, I., Amichay, G., Anichini, M., & Nityananda, V. (2021).

"Rhythm interaction in animal groups: selective attention in communication networks." *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1835), 20200338. (課題1および2の成果)

論文3 : Aihara, I., Kominami, D., Hosokawa, Y., & Murata, M. (2023). "Excitatory and inhibitory interactions affect the balance of chorus activity and energy efficiency in the aggregations of male frogs: Numerical simulations using a hybrid dynamical model." *Journal of Theoretical Biology*, 558, 111352. (課題2および3の成果)

論文4 : Kominami, D., Hosokawa, Y., Aihara, I. and Murata, M. "Energy-Efficient Self-Organized Coverage Control in LoRaWAN Inspired by Satellite Behavior of Japanese Tree Frogs." *in preparation*. (課題3の成果として投稿準備中)

学会および研究会での発表 : 口頭発表 12 件、ポスター発表 6 件.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aihara, I., Kominami, D., Hosokawa, Y., & Murata, M.	4. 巻 558
2. 論文標題 Excitatory and inhibitory interactions affect the balance of chorus activity and energy efficiency in the aggregations of male frogs: Numerical simulations using a hybrid dynamical model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Theoretical Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jtbi.2022.111352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Greenfield, M. D., Aihara, I., Amichay, G., Anichini, M., & Nityananda, V.	4. 巻 376
2. 論文標題 Rhythm interaction in animal groups: selective attention in communication networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rstb.2020.0338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Awano, M. Shirasaka, T. Mizumoto, H.G. Okuno, I. Aihara	4. 巻 107
2. 論文標題 Visualization of a chorus structure in multiple frog species by a sound discrimination device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Comparative Physiology A	6. 最初と最後の頁 87-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00359-021-01463-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Ikkyu Aihara
2. 発表標題 Synchronization of frog choruses
3. 学会等名 Workshop on Synchronization and its Applications
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 二ホンアマガエルの合唱法則の実験的・数理的研究
3. 学会等名 第13回理論合成インシリコ生物学セミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 二ホンアマガエルの同期発声行動に関する実験的・数理的研究
3. 学会等名 第12回RCMSサロン
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Ishizuki, M. Ichimura, T. Ishimaru, T. Oda, R. Takeda, I. Aihara
2. 発表標題 Analysis of Frog Call Synchronization Through Playback Experiments Using Frog Robots
3. 学会等名 The XXVIII International Bioacoustic Congress
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 生嶋竜実, 武田龍, 合原一究, 駒谷和範
2. 発表標題 カエルの合唱音声に対する教師ありモノラル音源分離のためのスペクトル構造を用いたデータ拡張
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合原一究、武田龍、栗野皓光、青柳富誌生
2. 発表標題 先端的計測システムと数理モデルによる野生動物の音声コミュニケーション分析
3. 学会等名 鳥学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 カエルの音声コミュニケーション
3. 学会等名 生態学会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 市村匡輝、武田龍、合原一究、駒谷和範
2. 発表標題 生物音響解析のための音源分離を含む音響信号解析ツールとカエルのコーラス解析への適用
3. 学会等名 生物音響学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 カエルの合唱に潜む同期現象
3. 学会等名 理論生物学スプリングスクール（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 向曉慶一, 石附透真, 武田龍, 合原一究, 青柳富誌生
2. 発表標題 位相振動子モデルとロボットを用いたカエルの発声行動分析
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 Nonlinear Dynamics in Frog Choruses
3. 学会等名 iTHEMS Biology Seminar
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊直太, 合原一究, 青柳富誌生
2. 発表標題 遺伝アルゴリズムを用いたオスガエルの発声行動戦略のモデル選択
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 合原一究, 武田龍
2. 発表標題 2種の音響計測システムを併用したニホンアマガエルの多音源定位・分離解析
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石附透真, 合原一究
2. 発表標題 競争下におけるニホンアマガエルの鳴き方の遷移法則の解析
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白坂誠浩, 武田龍, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 音響計測と信号処理に基づくスズムシの鳴き交わしの特徴分析
3. 学会等名 生態学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白坂誠浩, 武田龍, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 音響計測に基づくスズムシの鳴き交わしの特徴分析
3. 学会等名 動物行動学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 カエルの合唱法則の実験的・数理的研究
3. 学会等名 京都大学MACSセミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 情報学で紐解くカエルの合唱法則
3. 学会等名 第38回京都大学地球環境フォーラム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学TRIOS https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003870 researchmap https://researchmap.jp/ikkyu_aihara 個人HP https://sites.google.com/site/ikkyuaihara/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小南 大智 (Kominami Daichi) (00709678)	大阪大学・大学院情報科学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	村田 正幸 (Murata Masayuki) (80200301)	大阪大学・大学院情報科学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	青柳 富誌生 (Aoyagi Toshio) (90252486)	京都大学・情報学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------