

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12396

研究課題名(和文)カエルの合唱法則に基づく群知能アルゴリズムの創出

研究課題名(英文)Studies on Swarm Intelligence Inspired by Frog Choruses

研究代表者

合原 一究 (Ikkyu, Aihara)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：70588516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：カエルの合唱法則を対象にした基礎研究および応用研究に取り組んだ。日本の広範囲に生息するニホンアマガエルは、オスがメスを呼ぶために集団で鳴き声を発する。この行動を計測すると、短時間スケールでは鳴くタイミングをずらし、長時間スケールでは発声状態と休止状態を協調的に切り替えることがわかってきた。本研究では、これらの現象をカエルが内部状態と相互作用に応じて自身の状態を時間離散的に切り替えるハイブリッド力学モデルとして記述した。そのうえで、提案モデルを拡張し無線センサネットワーク上で自律分散的に動作する通信方式を提案した。さらに、提案モデルを用いた数値シミュレーションを行い、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：We studied the mechanisms of frog choruses from the viewpoints of mathematical modeling and its application. Empirical studies demonstrate that Japanese tree frogs (*Hyla japonica*) show collective choruses while avoiding call overlaps with neighbors. We reproduce these phenomena by using a hybrid mathematical model in which separate dynamical models are switched depending on internal conditions of respective frogs and interactions with other frogs. Next, we proposed a novel method of the control of a wireless sensor network based of the model of frog choruses. Numerical simulation demonstrate that the proposed model can contribute to the reduction of power consumption as well as the reduction of packet collision in a wireless sensor network.

研究分野：数理生物学

キーワード：非線形動力学 動物行動学 バイオミメティクス

## 1. 研究開始当初の背景

鳥の群れ運動やホタルの発光現象など、動物はさまざまな集団行動を示す。このような動物の行動は、群知能の観点からも研究者の注目を集め、種々の最適化アルゴリズムとして、実社会への応用に向けた研究が進められている。動物は我々人間よりも遥かに少ないエネルギーで生活しており、その集団行動には省エネルギーで高度なパフォーマンスを実現するメカニズムが内在するものと期待できる。

カエルは一般に多くのオスが繁殖地で鳴き交わす。そのために、メスは多くのオスの中から自分好みの個体を選ぶ状況が生じる。逆に、オスは他のライバルにさきがけてメスを獲得するための工夫が必要となる。

研究代表者らの先行研究から、ニホンアママガエルのオスが互いに発声タイミングをずらす逆相同期現象や三相同期現象が明らかになっている。このような行動には、鳴くタイミングをずらすことで、自身の存在をメスに明確にアピールする効果があるものと考えている。また、長時間の発声データを予備的に解析したところ、発声状態と休止状態（鳴き声を発さずにじっとしている状態）を、個体ごとが同時に切り替えることがわかってきた。本研究では、このような異なる時間スケールで生じる2つの特性に着目する。

一方、無線センサネットワークは、多数のセンサ付き無線端末（以下、端末と略記）を空間的に配置し、種々の情報を収集する通信システムの総称である。温度・湿度センサを使用した環境モニタリング、ひずみセンサを使用したビルや橋などの状態モニタリングなど、その実用例は枚挙にいとまがない。このように多数の端末を利用するシステムでは、(1) 近接する端末とのパケット衝突の回避、(2) 自律分散型制御によるネットワーク全体での省エネルギー化が要求される。

本研究課題では、カエルの合唱法則の数理モデリングを行い、そのモデルを拡張することで新しい通信方式の構築を目指す。

## 2. 研究の目的

カエルの合唱法則に基づいて、新しい群知能アルゴリズムを提案する。まず、ニホンアママガエルの合唱の計測結果をもとに、短い時間スケールでは近くの個体同士が鳴くタイミングをずらし、長い時間スケールでは確率的に振動状態と休止状態を切り替える現象を再現するハイブリッド力学モデルを考案する。さらに、情報通信性能と省エネルギー機能のトレードオフの観点からその機能を

改良する。これにより、特に無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network, 以下 WSN と略記) など情報通信技術が抱える問題の解決に寄与することを目的とする (図1参照)。

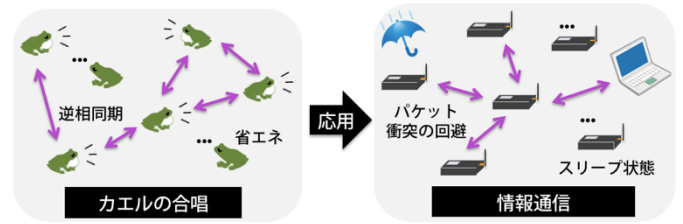


図1：カエルの合唱法則に基づく群知能アルゴリズム。カエルが交互に鳴く現象、そして発声状態と休止状態を協調的に切り替える現象を数理モデル化し、無線センサネットワーク上で自律分散的にデータパケットをやりとりする通信方式に応用する。

## 3. 研究の方法

上記目的の達成のため、以下の3つの課題に取り組んだ。

### [カエルの合唱モデル]

長時間スケールの協調的な状態遷移を説明するために、位相、体力、疲労度という3つの内部自由度に基づくハイブリッド力学モデルを構築した (図2参照)。まず、短時間スケールで鳴くタイミングをずらす同期現象については、先行研究に基づいて位相振動子モデルを用いて記述した。そのうえで、体力と疲労度に応じて、確率的に状態を遷移する数理モデルへと拡張した。提案した数理モデルの数値シミュレーションに加え、実際に計測した実験データを解析することで、提案モデルの妥当性を検証した。

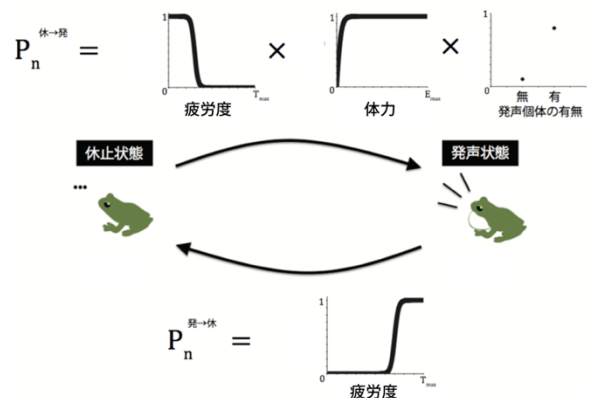


図2：カエルの合唱モデルの概要。長時間スケールでは体力、疲労度、近接個体との相互作用に応じて、時間離散的に状態を切り替える。短時間スケールで発声タイミングをずらす現象については、位相モデルを用いて記述する。

### [WSN 上での通信方式への拡張]

カエルの合唱モデルを無線センサネットワーク上での通信方式に拡張した。まず、カ

カエルの鳴くタイミングを、個々の端末がデータパケットを送信するタイミングと見なした。次に、カエルの体力を、端末の電池残量とした。カエルの疲労度は、端末の連続動作時間を制限する仮想的なパラメータとして用いた。

短時間スケールでの通信タイミングは位相モデルに基づいて記述した。ただし、データパケットの受信時のみ相手端末の情報を知れるという、無線センサネットワーク特有の状況を考慮し、デルタ関数で結合した位相モデルへと拡張した。この拡張した数理モデルを用いた数値シミュレーションを、さまざまな状況を想定して繰り返し行うことで、提案手法の通信方式としての有効性を検証した。

### [WSN 上での通信への応用]

提案モデルの検証に向けて、実際の無線センサネットワークを構築した。具体的には、マイクロフォンアレイを搭載した無線端末を複数配置し、音声を広範囲に渡って計測できるシステムの構築に取り組んだ。

## 4. 研究成果

上記の課題について得られた結果を記す。

### [カエルの合唱モデル]

カエルの合唱法則に関する数理モデルを用いた数値シミュレーションを行なった。まず、ニホンアマガエルの実験データと先行研究結果に基づいて、数理モデル内のパラメータの値を設定した。そのパラメータ値での数値シミュレーションを行い、短時間スケールでは発声タイミングをずらし、長時間スケールでは協調的に状態を切り替える現象を定性的に再現した (図3参照)。

実験データに関しては、ニホンアマガエル以外の種に関する網羅的な先行研究のサーベイを行なったほか、代表者の合原が取得したアカメアマガエル (オーストラリア東部に生息) のデータを解析した。その結果、短時間スケールで鳴くタイミングをずらす現象、長時間スケールで発声状態と休止状態を時間離散的に切り替える現象について多くの種で共通することを確認した。

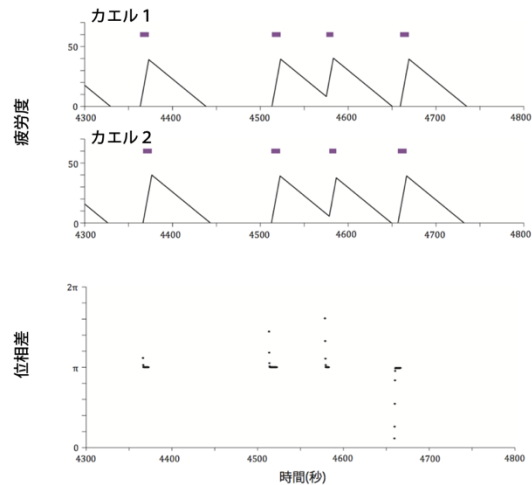


図3：カエルの合唱モデルの数値シミュレーション。長時間スケールでは個体同士が協調的に状態を切り替える一方で、短時間スケールでは個体同士でなるべく位相差を保持する結果が得られた。

### [WSN 上での通信方式への拡張]

無線センサネットワークの制御へと拡張した数理モデルを用いた数値シミュレーションを行った。その結果、100台程度の端末を空間的に配置した場合でも、(1)短時間スケールではパケット衝突 (すなわち同相同期状態) を回避し、(2)長時間スケールでは端末同士がほぼ同じタイミングで通信状態と休止状態を切り替えることがわかった (図4参照)。

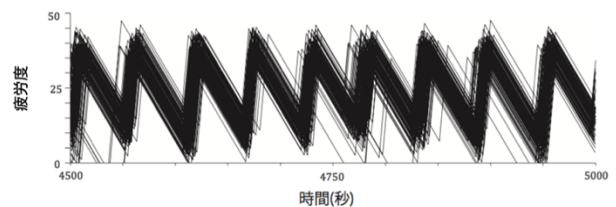


図4：100台の無線センサネットワークを想定した数値シミュレーション。端末同士が協調的に状態を切り替える結果が得られた。この結果には消費電力を低減しつつ、周期的にネットワークの接続性を高める効果が期待できる。

無線センサネットワークについては、できるだけ消費電力を下げ、同時にネットワーク全体の接続性を上げることが重要となる。本研究で得られた長時間スケールでほぼ同時に状態を切り替える性質については、休止状態を定期的に挟むことで消費電力を低減し、さらに同時に通信状態に切り替えることで接続性を上げる機能が期待できる。

一方、同時に通信状態に切り替える場合、パケット衝突が増加する危険性が想定される。そこで、短時間スケールの同期状態も解析した結果、デルタ関数型の位相モデルによって、短時間スケールでの同相同期状態 (すなわちパケット衝突) も回避できていることがわかってきた。また、より具体的な解析として、位相モデルを LPWA ネットワーク上で

の通信制御に応用する研究にも取り組んだ。

以上の成果には、消費エネルギーとパケット衝突を下げつつ、瞬間的にネットワークの接続性を高める通信方式としての有用性が期待できる。

### 【WSN 上での通信への応用】

提案モデルの実環境での有効性検証を視野に入れ、無線センサネットワーク型の音源定位システムを構築し、実際の音源推定実験に取り組んだ（図5参照）。個々の無線端末は Raspberry Pi で小型マイクアレイを搭載した。そのうえで、端末ごとに音源到達方向を推定し、その情報を時系列データとして習得・統合するシステムを構築した。この計測システムを運用し、室内もしくは野外で、スピーカーから再生した生物の鳴き声を高精度で定位できることを示した。今後の課題としては、多数の端末を配置したシステムへと拡張し、その端末同士の通信を提案モデルで制御することで、提案モデルの有効性を検証する必要がある。

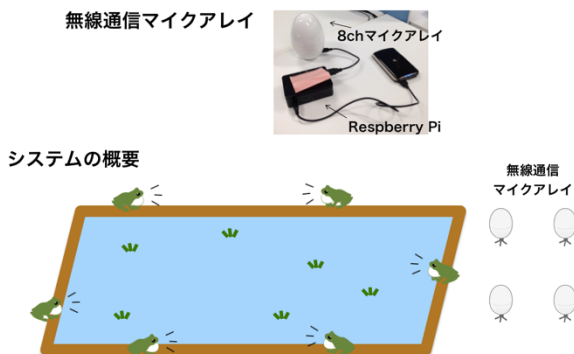


図5：マイクアレイを搭載した無線センサネットワークの構築。マイクアレイを搭載した無線端末を複数配置し、音源位置を推定するシステムの構築に取り組んだ。そのうえで、スピーカーから音声を再生する実験、実際のフィールドでの計測実験を行い、構築したシステムの有効性を検証した。

以上の研究成果は、4編の雑誌論文（査読無3編、査読有1編）、4件の学会発表として公表した。また、雑誌論文[1]を発展させた成果の査読付き英文誌への投稿準備を進めている。

## 5. 主な発表論文等

### 雑誌論文（計4件）

[1] 合原一究、小南大智、平野康晴、村田正幸、「カエルの合唱法則に基づく無線センサネットワークの制御手法の提案」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol. 116, pp. 347-352, 2017.（査読無）

[2] 小南大智、合原一究、村田正幸、「LPWAネットワークにおける基地局負荷の分散を考慮した自律分散型送信スケジューリング手法」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol. 117, pp. 127-132, 2017.（査読無）

[3] I. Aihara, P. J. Bishop, M. E. B. Ohmer, H. Awano, T. Mizumoto, H. G. Okuno, P. M. Narins, and J.-M. Hero, "Visualizing Phonotactic Behavior of Female Frogs in Darkness," Scientific Reports, Vol. 7, Article Number 10539, 2017.（査読有）

[4] 細川侑嗣、小南大智、合原一究、村田正幸、「無線ネットワークにより相互接続したマイクロホンアレイを用いた音源位置推定手法の実装」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol. 117, pp. 23-28, 2018.（査読無）

### 学会発表（計4件）

[1] Ikkyu Aihara, "Spatio-temporal structures in frog choruses revealed by sound-imaging device," 第65回生態学会, 2018.

[2-4] 上記、雑誌論文[1, 2, 4]の学会発表.

### その他

ホームページ：

<https://sites.google.com/site/ikkyuaihara/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

合原 一究（筑波大学・システム情報系・助教）

研究者番号：70588516

### (2) 研究分担者

小南 大智（大阪大学・経済学研究科・助教）

研究者番号：00709678