

カエルの合唱法則に基づく無線センサネットワーク制御手法の提案

合原 一究[†] 小南 大智^{††} 平野 康晴^{†††} 村田 正幸^{†††}

[†] 筑波大学 システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

^{††} 大阪大学 大学院経済学研究科 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

^{†††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †aihara@cs.tsukuba.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp, †††{y-hirano,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし カエルの発声行動の数理研究に基づき、無線センサネットワークの自律分散型制御手法を提案する。全世界に約 6500 種が生息するカエルは、そのほとんどが夜行性であり、オスがメスを呼ぶために鳴き声を発する。一般に繁殖地には多くのオス個体が共存し、個体同士が同期して発声状態と休止状態を切り替える行動を観察できる。また、2 匹の発声行動に注目すると、個体同士が交互に鳴く逆相同期状態が多くの種で報告されている。本稿では、カエルの発声行動の内、「長時間スケールでの協調的な状態遷移」と「短時間スケールでの逆相同期状態」を再現するハイブリッドな力学モデルを構築する。その上で、提案モデルを拡張することで、通信状態とスリープ状態を一斉に切り替えつつ、自律分散的にパケット送信タイミングをずらせる通信方式を提案する。

キーワード 群知能、バイオミメティクス、力学系、状態遷移、カエルアルゴリズム

Autonomous distributed control methods for wireless sensor networks based on nonlinear dynamics of frog choruses

Ikkyu AIHARA[†], Daichi KOMINAMI^{††}, Yasuharu HIRANO^{†††}, and Masayuki MURATA^{†††}

[†] Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{††} Graduate School of Economics, Osaka University

^{†††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

E-mail: †aihara@cs.tsukuba.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp, †††{y-hirano,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract There are about 6500 species of frogs around the world. Most of the frog species are nocturnal in their habitat. In general, many individuals of male frogs vocalize calls to attract conspecific females in darkness, which is called as a frog chorus. In this study, we first propose a mathematical model describing two aspects of such a frog chorus: 1) synchronous mode switching between calling state and silent state, and 2) anti-phase synchronization between two frogs. By extending the mathematical model, we propose a novel control method for wireless sensor networks to synchronize the timing of mode switching between transmission state and sleep state as well as alternate packet-transmission time among neighboring devices.

Key words Swarm intelligence, Biomimetics, Dynamical systems, Mode switching, Frog algorithm

1. はじめに

1.1 カエルの合唱

カエルは全世界に約 6500 種が生息し、多くの種でオスがメスを引き寄せるために鳴き声を発する (図 1A)。このような求愛のための鳴き声は広告音と呼ばれ、メスの獲得以外に、オス同士が縄張りを主張しあう役割が知られている [1], [2], [3]。夜行性のカエルにとって、鳴き声は暗闇でメスを呼び寄せ、かつオス同士がコミュニケーションするのに不可欠な手段と言える。

オス同士が交互に鳴く逆相同期状態 (図 1B) が、カエルの多くの種で報告されている [2], [3]。逆相同期状態では、オス同士が鳴き声の重複を避けるため、自身の鳴き声をメスに検出されやすくし繁殖を有利に進める効果があると考えられる [4], [5]。また、オス同士のコミュニケーションにおいては、お互いの縄張りを効率的に主張する効果が期待できる [5]。

一方、より長時間の特性に注目すると、周期的に鳴き声を発する状態 (発声状態) と鳴き声を一切発さない状態 (休止状態) を数分の時間間隔で切り替える行動が観測できる。カエルに

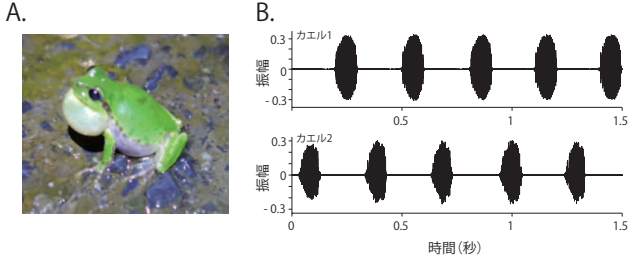


図1 ニホンアママガエルの発声行動。(A) 発声中のニホンアママガエル。(B) オス2匹の鳴き声の音声波形。鳴き声の重複を避けるように2匹が交互に鳴く。

として発声は膨大な体力消費を伴う [3]。そのため、発声状態と休止状態をうまく切り替えることで、身体疲労を回復したり、あるいは消費エネルギーを節約しながら、メスに自身の存在を効率よくアピールする必要がある。

本稿ではカエルの合唱特性の内、「1) 短時間スケールで発声タイミングをずらす逆同期状態」と「2) 長時間スケールで発声状態と休止状態を協調的に切り替える状態遷移」を確率的な遷移過程を伴うハイブリッド力学系として記述する。その上で、数理モデルを拡張することで、無線センサネットワークをはじめとする種々の通信システムに応用可能な自律分散型の通信方式を提案する。

1.2 無線センサネットワーク

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 [6]。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には、一般に以下の課題が存在する。

- **パケット衝突の回避**： 端末の多くは、自身が信号（パケット）を送っている間は、他の端末からの信号を受信できない。そのため、近傍の端末同士が互いに信号送信タイミングをずらすことで、パケット衝突による情報損失を回避する必要がある。

- **消費電力の削減**： 全体が一斉に起動し、必要最小限の時間で情報をシンクへ送ることで、ネットワーク全体での消費電力の削減が可能となる。そのためには、端末同士が協調して通信状態とスリープ状態を切り替える必要がある。

これらの課題を端末の自律分散型制御によって解決することは、長時間の安定した情報収集の実現、および通信ネットワークの運用コストの削減に大きく寄与するものと期待できる。

本論文では、カエルの合唱法則を記述する数理モデルを提案し（第2章）、その数理モデルに基づいて無線センサネットワークの自律分散型の制御手法を提案する（第3章）。

2. カエルの合唱モデル

2.1 逆同期に関する先行研究

カエルの逆同期状態を再現する数理モデルとして、著者ら

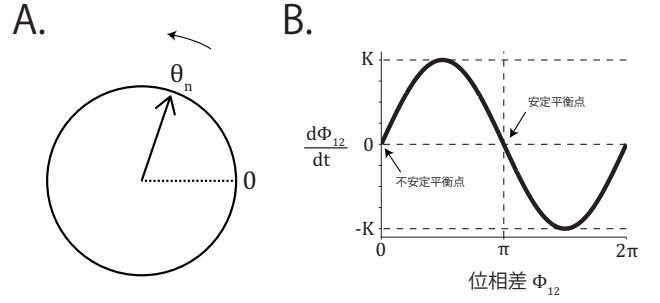


図2 位相モデルの概念図。(A) 位相の定義。(B) 2体の位相モデルにおける平衡点。自然振動数 ω_n が等しく、相互作用項として式 (2) の \sin 関数を仮定した場合、逆同期状態が漸近安定な平衡点になる。

の先行研究を紹介する [9], [10], [11]。まず、 n 番目のカエルの発声タイミングを以下の位相モデル [7], [8] で記述する：

$$\frac{d\theta_n}{dt} = \omega_n + \sum_{m=1}^N \Gamma_{nm}(\theta_n - \theta_m). \quad (1)$$

変数 θ_n を長さ 2π の円環上で定義し、円環上の任意の一点を原点 $\theta_n = 0$ に選ぶ (図 2A)。さらに、 θ_n と $\theta_n + 2l\pi$ (l は整数) は同じ状態とする。この変数 θ_n を位相と呼ぶ。 ω_n は正のパラメータで、 n 番目の振動子の自然振動数を表す。このモデルでは、 $\theta_n = 0$ になる度に n 番目のカエルが鳴き声を発すると仮定する。

位相モデルでは、相互作用項 $\Gamma_{nm}(\theta_n - \theta_m)$ (ただし、 $n \neq m$) は位相差 $\theta_n - \theta_m$ の 2π 周期関数で定義される [7], [8]。そこで、カエル2匹の発声行動のシンプルなモデル化として、 $N = 2$ かつ $\omega_1 = \omega_2$ の場合を考え、さらに 2π 周期関数の典型例として以下の \sin 関数を仮定する [9], [10], [11]：

$$\Gamma_{nm}(\theta_n - \theta_m) = K \sin(\theta_n - \theta_m). \quad (2)$$

ここで、2匹の位相差を変数 ϕ_{12} で $\phi_{12} \equiv \theta_1 - \theta_2$ と記述する。式 (1)、(2) および $\omega_1 = \omega_2$ から位相差 ϕ_{12} の時間発展を表す方程式を以下のように記述できる：

$$\frac{d\phi_{12}}{dt} = \frac{d\theta_1}{dt} - \frac{d\theta_2}{dt} = 2K \sin \phi_{12}. \quad (3)$$

$\frac{d\phi_{12}}{dt} = 0$ となる平衡点 $\phi_{12} = \phi_{12}^*$ を求めると、 $\phi_{12}^* = 0$ が漸近不安定な平衡点、 $\phi_{12}^* = \pi$ が漸近安定な平衡点になる (図 2B)。本モデルでは、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$ で個々のカエルが鳴くと仮定している。そのため、漸近安定な平衡点 $\phi_{12}^* = \pi$ が2匹が交互に鳴く逆同期状態を再現する。

2.2 提案モデル

カエルの発声行動は喉にある大きな袋（鳴嚢）を高速で膨張・収縮させる全身運動に基づいており (図 1A)、大きなエネルギー消費 [3] に加えて身体疲労も伴うと考えられる。エネルギー消費に関しては、普通、合唱に参加している個体は夜間は餌を食べない。そのため、一晚という時間スケールで考えると、エネルギーは回復せず減少する一方だろう。他方で、激しい運

動による身体疲労は、休息することで次第に回復していくと考えられる。本研究では、このようなエネルギーと身体疲労の長時間ダイナミクスに注目することで、より現実的なカエルの合唱モデルを提案する。

まず、 n 番目のカエルの休止状態と発声状態を変数 s_n を用いて識別する。具体的には、 $s_n = 0$ を休止状態に、 $s_n = 1$ を発声状態に対応させる (図 3)。その上で、休止状態を次式でモデル化する：

$$\frac{d\theta_n}{dt} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = -\alpha. \quad (6)$$

ここで、 θ_n が発声タイミングを表す位相、 E_n がエネルギー、 T_n を疲労度である。休止状態では一切鳴き声を発さないため、位相は変化しないと考える (式 (4))。エネルギー E_n と疲労度 T_n には上限と下限が存在し ($0 \leq E_n \leq E_{\max}$ および $0 \leq T_n \leq T_{\max}$)、上限もしくは下限に達すると、それ以上変化しないと仮定する。休止状態では、エネルギーは一定値に留まり (式 (5))、疲労度は減少していくとする (式 (6))。

次に、発声状態を次式でモデル化する：

$$\frac{d\theta_n}{dt} = \omega + \sum_{m=1}^N \delta(\theta_m) \Gamma_{nm} (\theta_n - \theta_m), \quad (7)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = -\delta(\theta_n), \quad (8)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = \delta(\theta_n). \quad (9)$$

発声タイミングは、式 (7) のように第 2.1 節の位相モデルを拡張して記述する。 r_{nm} は n 番目と m 番目のカエル間の距離、 r_0 はカエル同士がお互いに鳴き声を認識可能な距離、 $\delta(\theta_n)$ はディラックのデルタ関数である。これにより、縄張り内に位置する個体同士が発声時のみ相互作用することになる (ただし、位相 θ_n は 2π を超えると 0 にリセットされると仮定する)。発声時の自然振動数 ω_n は同種のカエルであれば近い値をとるため、ここでは $\omega_n = \omega$ としている。エネルギーと疲労度については、式 (8) および (9) を用いて、発声ごとにエネルギー E_n は 1 ずつ減少し疲労度 T_n は 1 ずつ増加すると考える。

以上の休止状態と発声状態に対し、状態間の遷移確率を次式で定義する：

$$P_n^{\text{休} \rightarrow \text{発}} = F_1(T_n)G(E_n)H(\vec{s}), \quad (10)$$

$$P_n^{\text{発} \rightarrow \text{休}} = F_2(T_n). \quad (11)$$

ここで、 $P_n^{\text{休} \rightarrow \text{発}}$ は休止状態 ($s_n = 0$) にある個体が発声状態 ($s_n = 1$) に遷移する確率、 $P_n^{\text{発} \rightarrow \text{休}}$ は発声状態 ($s_n = 1$) にある個体が休止状態 ($s_n = 0$) に遷移する確率である。ベクトル $\vec{s} = (s_1, s_2, \dots, s_N)^T$ は全てのカエルの状態を表す。

遷移確率 $P_n^{\text{休} \rightarrow \text{発}}$ を、具体的に記述する。まず、カエルは疲

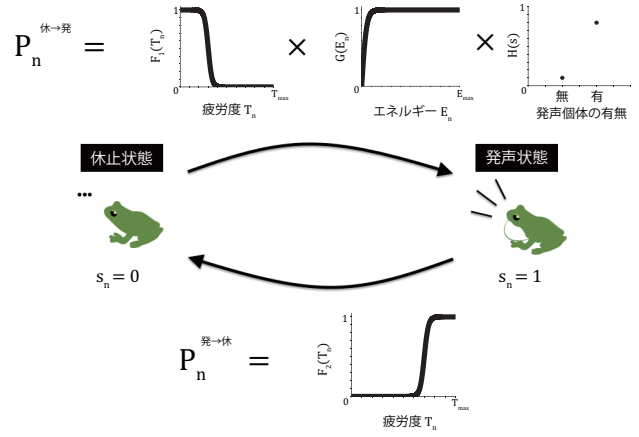


図 3 カエルの状態遷移モデル。疲労度 T_n とエネルギー E_n という内部自由度に加えて、他の個体の状態 s_m に応じて休止状態と発声状態を切り替える。

疲労度 T_n が小さく、エネルギー E_n が大きい場合に鳴き始めやすいと考える。この仮説のモデル化として、式 (10) の $F_1(T_n)$ および $G_1(E_n)$ を次式で記述する (図 3)：

$$F_1(T_n) = \frac{1}{\exp(-a(T_n - T)) + 1}, \quad (12)$$

$$G(E_n) = -\frac{2}{\exp(bE_n) + 1} + 1, \quad (13)$$

一方、ニホンアマガエルやヌマガエルをはじめとする多くの種で、1 匹が鳴き始めるとそれに追従して他の個体が鳴き始める。この知見に基づき、式 (12) の $H_1(\vec{s})$ は、近くで他個体が鳴いている場合 (Case 1: $s_m = 1$ かつ $r_{nm} < r_0$ を満たす m が存在する場合) と、近くで他個体が鳴いていない場合 (Case 2: $s_m = 1$ かつ $r_{nm} < r_0$ を満たす m が存在しない場合) で異なる値をとると考える：

$$H(\vec{s}) = \begin{cases} p_{\text{high}} & (\text{Case 1: 近くで鳴いている場合}), \\ p_{\text{low}} & (\text{Case 2: 近くで鳴いてない場合}). \end{cases} \quad (14)$$

なお、周辺個体の状態推定に関しては、個々のカエルは $r_{nm} < r_0$ に存在する個体のいずれかが最近鳴いた時刻を覚えていて、検知した鳴き声との間隔が閾値 ΔT_{call} 以下であれば Case 1、閾値以上であれば Case 2 にあたると判断できると仮定する。

式 (11) の遷移確率 $P_n^{\text{発} \rightarrow \text{休}}$ を与える関数 $F_2(T_n)$ は次式で記述する (図 3)：

$$F_2(T_n) = \frac{1}{\exp(a(T_n - T)) + 1}, \quad (15)$$

この定式化は、カエルは一旦鳴き始めると疲労度が大きくなるまで鳴き続けるという仮説に基づく。

最後に、状態遷移については、 ΔT_{update} ごとに、エネルギー E_n 、疲労度 T_n 、と他個体の状態推定結果に応じた確率を式 (10) もしくは (11) から計算し、その確率に従って状態を切り替える。

2.3 数値シミュレーション

提案モデルに基づいて、2 匹のカエルが近距離 ($r_{12} < r_0$)

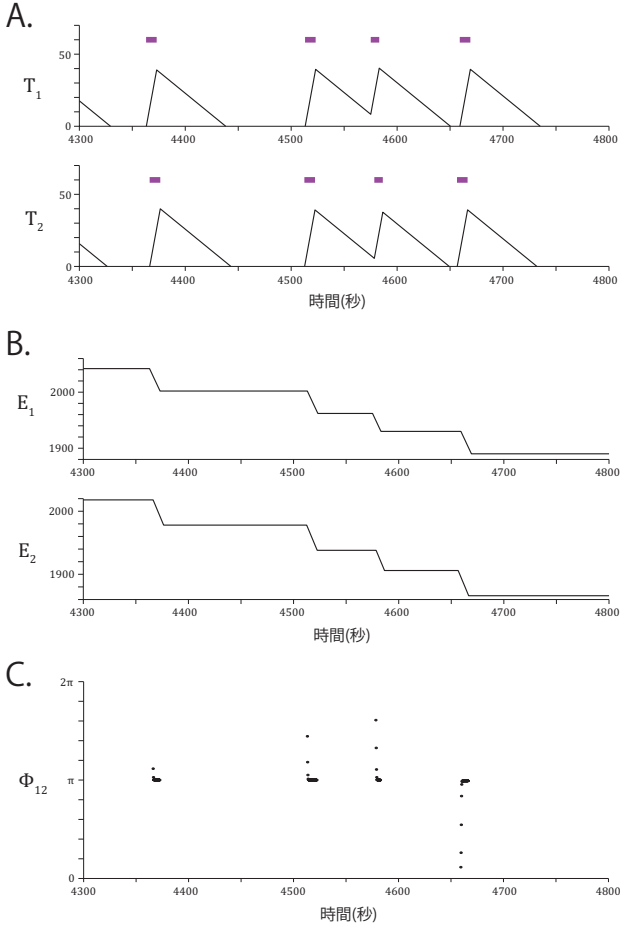


図4 カエル2匹の合唱モデルの数値シミュレーション。(A) 疲労度 T_n , (B) エネルギー E_n , (C) 位相差 ϕ_{12} 。図Aの紫のバーは、個々のカエルの発声区間を表す。

で鳴き交わす状況を調べる数値シミュレーションを行った。位相モデルの相互作用項は式(2)の \sin 関数を仮定し、種々のパラメータは試行錯誤の結果、以下の値とした： $\omega = 8\pi$, $K = 0.5$, $\alpha = 0.15\omega/2\pi$, $E_{\max} = 3000$, $T_{\max} = 50$, $a = 1$, $b = 0.08$, $T = 15$, $p_{\text{high}} = 0.80$, $p_{\text{low}} = 0.01$, $\Delta T_{\text{call}} = 3\pi/\omega$, $\Delta T_{\text{update}} = 16\pi/\omega$ 。

数値シミュレーションの結果を、図4に示す。図4Aからは、疲労度 T_n は増減を繰り返すこと、個体間で増減のタイミングがほぼ一致することがわかる。これは、2匹がほぼ同時に状態を切り替える合唱状態の形成を意味する。一方、図4Cからは、合唱状態では位相差 ϕ_{12} が逆同期状態に短時間で収束する様子がわかる。

以上の数値シミュレーションから、カエルの合唱特性の内、「発声状態と休止状態を協調的に切り替える現象」と「発声区間における2匹の逆同期状態」の両方を提案モデルが再現することがわかった。

3. 通信方式への応用

3.1 無線センサネットワークとの対応

第2.2節で導入したカエルの合唱モデルを、無線センサネットワークの通信制御の問題に応用したい。そのために、カエル

の行動とセンサ付き無線端末の制御を以下のように対応させる：

- **端末の状態**：カエルの発声状態を端末が周期的にパケットを送る通信状態、休止状態を端末がパケットを送らずに消費電力を削減するスリープ状態とみなす。
- **パケット送信**：位相 θ_n を用いて、個々の端末によるパケット送信タイミングを記述する。具体的には、 $\theta_n = 0$ になるたびに、 n 番目の端末が近傍で通信状態にある端末 ($r_{nm} < r_0$ かつ $s_m = 1$ を満たす m 番目の端末) にパケットを送るとする。
- **電池残量**：エネルギー E_n を、 n 番目の端末の電池残量とみなす。
- **連続動作時間**：疲労度 T_n は、 n 番目の端末が電池残量 E_n を周期的な通信に効率的に配分するための変数とみなす。なお、多少限定的な状況ではあるが、端末が通信によって過度に発熱してしまうような場合、疲労度 T_n は端末の連続動作時間を制限するための変数ともみなせる。

以上を仮定した上で、通信制御への応用には2つの問題が想定される。1つ目は、計算コストの問題である。式(4)-(9)にあるように、カエルの行動モデルでは時間に関する常微分方程式を用いている。この方程式をそのまま微小時間について離散化すると、端末に膨大な計算コストを要求することになる。2つ目は、同同期状態からの復帰時間の問題である。第2.3節では位相モデルの相互作用項として \sin 関数を仮定した。 \sin 関数を用いる場合、パケットを同時に送信してしまう同同期状態 ($\phi_{nm} = 0$) が不安定な平衡点となる(図2B)。そのため、同同期状態近傍に初期条件を設定すると、同同期状態から離れるまでに長い時間を要することが予想される。

3.2 数理モデルの改良

端末に要求される計算量を削減するために、提案モデルの計算方法を改良する。まず、パケットのみ送信予定時刻 t_n を導入し、式(7)の位相 θ_n の計算を簡略化する。具体的には、 n 番目の端末がパケットを送信するたびに、自身の位相を $\theta_n = 0$ にリセットすると同時に、次の送信予定時刻を $t_n = t + 2\pi/\omega$ に設定する。その上で、 m 番目の端末からパケットを受け取ると、自身の位相を $\theta_n \rightarrow \theta_n + (t - t')\omega + \Gamma_{nm}(\theta_n)$ に更新し(ただし、 t' は他の端末から前回パケットを受け取った時刻)、その位相を用いて送信予定時刻を $t_n \rightarrow t + (2\pi - \theta_n)/\omega$ に更新する。さらに、スリープ状態の疲労度 T_n を、遷移確率を計算するたびに、式(6)の変化率 α を用いて $T_n \rightarrow T_n - \alpha\Delta T_{\text{update}}$ に更新する。以上の改良により、微小時間ごとに個々の値を更新する必要がなくなり、計算量の削減が期待できる。

次に、パケット衝突が生じる同同期状態から短時間で復帰できるように、数理モデルを改良する。具体的には、式(7)の相互作用項を以下の線形関数で記述する(図5)：

$$\Gamma_{nm}(\theta_n - \theta_m) = -\frac{K}{\pi}(\theta_n - \theta_m - \pi). \quad (16)$$

第2.1節のように相互作用項として \sin 関数を仮定した場合、同同期状態 ($\phi_{nm} = 0$) での変化量が0になってしまう(図2B)。一方、線形関数を仮定した場合、図5に示すように同同期状態での変化量が大きくなる。そのため、一旦同同期状態になってしまっても、位相差を広げるように短時間で状態を

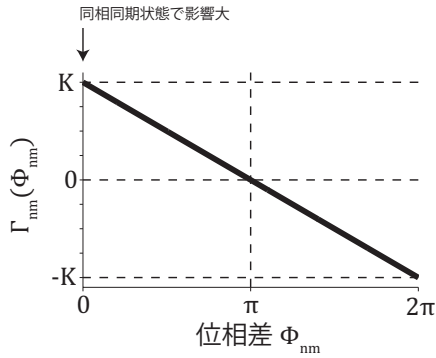


図5 相互作用項の改良。相互作用項を線形関数にすることで、同相同期状態 ($\phi_{nm} = 0$) での効果が大きくなる。

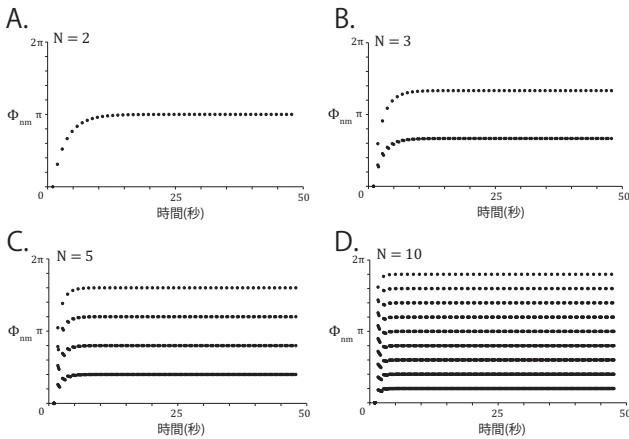


図6 線形相互作用関数の位相モデルを用いた数値シミュレーション。初期条件を同相同期状態に設定しても、なるべく大きな位相差を実現するように状態が収束していく。

変化させることが期待できる。

3.3 数値シミュレーション (短時間ダイナミクス)

第3.2節の位相モデルに基づいて、全ての端末が通信状態にある状況での短時間ダイナミクスを調べた。具体的には、式(7)のデルタ関数結合型の位相モデルにおいて、式(16)の線形の相互作用関数を仮定した場合に、速やかに同相同期状態を回避できるかを評価した。

N 台の端末がお互いに相互作用できる範囲に存在する場合(すなわち、全てのペアが $r_{nm} < r_0$ を満たす場合)に、初期条件を同相同期状態 ($\theta_1(t=0) = \theta_2(t=0) = \dots = \theta_N(t=0)$) に設定した数値シミュレーションの結果を図6に示す。なお、位相モデルのパラメータは、以下の値に設定した: $\omega = 8\pi$, $K = 0.5$ 。

端末数に依らず、なるべく大きな位相差を確保する状態に速やかに収束する様子がわかる。

3.4 数値シミュレーション (長時間ダイナミクス)

次に、第3.2節の手法に基づいて、100台の端末を2次元平面上のグリッドに配置した状況での長時間ダイナミクスを調べた。この際、最近接の端末間の距離を10mに設定し、通信可

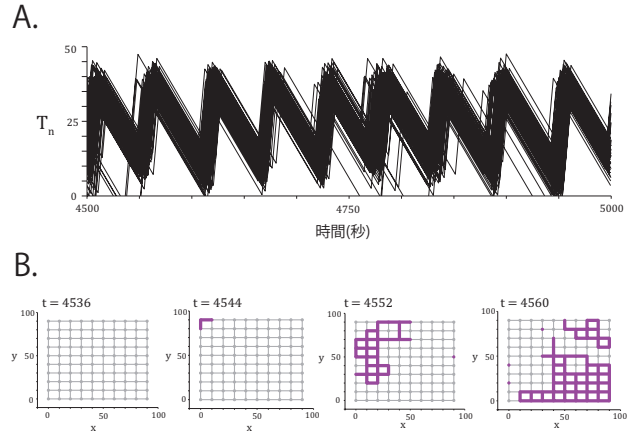


図7 2次元グリッドの空間配置を仮定した数値シミュレーション。(A) 100台の端末の疲労度 T_n の時系列データ、(B) 端末の動作状況を表すスナップショット。紫色のノードが通信状態の端末を、紫色のリンクが互いに通信しているペアを表す。

能距離 r_0 も同じく10mとした。位相モデルに関しては第3.3節と同様の仮定をおき、その他のパラメータは第2.3節と同じ値とした。

数値シミュレーションの結果を図7に示す。図7Aから、疲労度 T_n が一斉に増減を繰り返す様子がわかる。これは100台の端末がほぼ同期して通信状態とスリープ状態とを切り替えることを意味する。

図7Bに、端末の動作状況のスナップショットを示す。紫色のノードが通信状態の端末を、紫色のリンクが互いに通信しているペアを表す。全端末が休んでいる状態から、特定の端末が通信状態へと起動し、それに追従するように周囲の端末が起動していく様子がわかる。

4. 考 察

本稿では、カエルの合唱モデルに基づく無線センサネットワークの自律分散型制御手法を提案した。本手法の特徴としては、短時間ダイナミクスを位相モデルを拡張してモデル化した点、長時間ダイナミクスをカエルのエネルギーや疲労度に基づいてモデル化した点があげられる。

位相に基づく通信方式としては、Degesysn らの DESYNC が知られている [12]。DESYNC では、自分と位相の近い2つの端末の情報に応じて、自分の位相を更新していく。これにより、端末数が増減しても、その数に応じて位相差を最大限確保する状態を実現できる。一方、本手法では他の端末を識別する必要はなく、単にパケットを受け取った時刻の自分の位相に応じて、その値を更新すればよい点が異なる。

カエルの発声行動に基づく通信方式としては、牟田園らの手法が知られている [13]。牟田園らも短時間ダイナミクスに関しては位相モデルを基にしており、他の端末からパケットを受け取ると自身が次にパケットを送ったあとの自然振動数 ω_n を更新していく手法を提案した。また長時間ダイナミクスに関しては、近くの個体の状態に応じて自身の発声をあえて停止するカ

エルのサテライト行動 [1] に基づく手法を提案した。それにより、狭い範囲に多数の端末が存在する場合でも、余計な端末をうまくスリープ状態に切り替え、ネットワーク全体の消費電力の削減に成功している。一方で、本手法では、相手からパケットを受け取ると即座に自身の位相を更新する点が、短時間ダイナミクスに関して牟田園らの手法と異なる。また、長時間ダイナミクスについては、牟田園らは端末が空間的に密に存在している場合を想定しているのに対して、本手法ではある程度離れた端末同士の協調的なモード切り替えを対象にしている点が異なる。

今後の課題としては、上述の DESYNC や牟田園らの手法に加えて、TDMA や CSMA/CA などの関連手法との比較があげられる。それにより、短い時間スケールでうまく位相をずらす機能に関する本手法の有効性を検証する必要がある。また、長時間ダイナミクスについては、本手法を用いた予備的な数値計算から、ネットワークの構造によって特定の端末の電池の減り方に差が出るのがわかりつつある。無線センサネットワークを実際に運用する際、端末ごとの電池の減り方を揃えられれば、電池交換を一齐に行えるため、運用コストの削減が期待できる。例えば、エネルギーハーベスティングを併用し、電池の減りが早い端末を遠隔で充電することで、電池の減り方をきちんと揃えられる可能性がある。このような長時間ダイナミクスについてもさらに研究を進め、より現実の問題に適応可能な手法へと改善していきたい。

5. 結 論

カエルの発声行動を再現する数理モデルを構築・改良し、無線センサネットワークの自律分散型制御手法を提案した。短時間ダイナミクスに関しては、位相モデルを拡張することで、個体数に依らず位相差を最大限確保する状態を実現した。長時間ダイナミクスに関しては、カエルのエネルギーと疲労度に関する数理モデルを構築し、それに基づいて、端末同士の協調的な状態遷移を実現した。これらの性質には、無線センサネットワーク上において、端末同士が通信状態とスリープ状態を協調的に切り替えて、自律分散的にパケット送信タイミングをずらす機能が期待できる。今後は、関連手法との比較やパラメータを網羅的に変化させる数値シミュレーションを行い、短時間ダイナミクスと長時間ダイナミクスの両面から提案手法の性能評価を進めていく予定である。

謝辞 本研究は科研費・挑戦的萌芽研究 (No. 16K12396) の支援を得て行われた。

文 献

- [1] 松井正文, "両生類の進化," (東京大学出版, 東京, 1996).
- [2] K. D. Wells, *The ecology and behavior of amphibians*, (The University of Chicago Press, Chicago, 2007).
- [3] H.C. Gerhardt and F. Huber, *Acoustic communication in insects and anurans*, (University of Chicago Press, Chicago, 2002).
- [4] M. A. Bee, J. J. Schwartz, and K. Summers, "All's well that begins Wells: celebrating 60 years of Animal Behaviour and 36 years of research on anuran social behaviour," *Animal Behavior*, **85**, 5-18 (2013).

- [5] I. Aihara, R. Takeda, T. Mizumoto, T. Otsuka, T. Takahashi, H. G. Okuno, K. Aihara, "Complex and transitive synchronization in a frustrated system of calling frogs," *Phys. Rev. E*, **83**, 031913 (2011).
- [6] 「小特集 知的環境を支えるセンサネットワーク」, 電子情報通信学会誌, Vol.97, No.8 (2014).
- [7] 蔵本由紀, 河村洋史: 『同期現象の数理』(培風館, 2010).
- [8] Y. Kuramoto, "Chemical oscillations, waves, and turbulence," (Springer-Verlag, Berlin, 1984).
- [9] 合原一究, "「かえるのうた」に耳をすませば 身近な生物の同期現象", 物理学会会誌, **70-10**, 782-784 (2015).
- [10] 合原一究, 辻繁樹, 香取勇一, 合原一幸, "脳の現象数理 - ニューロン, ニューラルネットワーク, 行動のモデル", 現象数理学入門 (三村 昌泰 編), pp.109-143, 東京大学出版会 (2013).
- [11] I. Aihara, H. Kitahata, K. Yoshikawa and K. Aihara, "Mathematical modeling of frog's calling behavior and its possible application to artificial life and robotics," *Artificial Life and Robotics*, **12**, 29-32 (2008).
- [12] J. Degeysys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: Self-organizing desynchronization and TDMA on wireless sensor networks," *Proceedings of IPSN'07*, 11-20 (2007).
- [13] A. Mutazono, M. Sugano, and M. Murata, "Energy efficient self-organizing control for wireless sensor networks inspired by calling behavior of frogs," *Computer Communications*, **35**, 661-669 (2012).