

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700229

研究課題名(和文) モデル生物が示すゆらぎの実用的効果と最適解探索手法への応用

研究課題名(英文) Effectiveness of fluctuating oscillations in a model organism and its application to a path finding method for a transport network

研究代表者

清水 邦康 (Shimizu, Kuniyasu)

千葉工業大学・工学部・助教

研究者番号：10409451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、モデル生物が示す体の厚み振動を計測し、その振動データに非線形ダイナミクスを仮定することで、観測された振動パターン特徴量の抽出を試みた。また、このような振動パターン等の微小摂動を最短経路問題に応用可能な計算モデルに印加することで、その最適解探索への影響を調査した。特に、ある微小な外力を計算モデルに加えると、外力なしの場合と比較して最適解探索時間が短縮される結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we experimentally measure the oscillation pattern of the body thickness of a model organism. The observed data is analyzed assuming nonlinear dynamics. In addition, we introduce a weak forcing term, including the experimental data, to the shortest path finding algorithm, mimicking an adaptation process in the organism. One of the advantages is that the convergence time to reach steady state becomes shorter than that for the case with no perturbation.

研究分野：総合領域

キーワード：最適ネットワーク 非線形ダイナミクス 結合振動子 生体振動

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とするモデル生物は単純な構造の生き物であるにもかかわらず、高い環境適応能力を有する。また、この生物が示す適応的な餌場探索能力を模擬した計算モデルが提案されている。この生物の体は管状ネットワークから構成されており、環境適応的に体を制御する際に代謝活動に伴う体の厚み振動パターンが重要な役割を果たすと考えられる。また、この振動にはゆらぎを内包していると考えることが自然であるが、このような振動パターンと環境に合わせた適応的行動との関係性に関しては詳しく分かっていない。

2. 研究の目的

本研究では、モデル生物が示す実際のゆらぎを内包した体の厚み振動を計測して得られる振動データを解析し、振動パターンの特徴量を抽出することを試みる。また、このようなゆらぎを最短経路問題に適用可能な計算モデルに印加することで、その最適解探索への影響を調査することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 厚み振動データ計測

実験対象の生物を小さな円領域が細い経路で格子状に結ばれた構造内に設置して、結合振動子系を構築する。振動データ取得のために、研究代表者が関連文献を参考に独自開発した図1に示す計測システムを使用する。25℃、85%RHに設定した恒温恒湿槽内において、モデル生物を設置するステージの下部より数ルクス程度の微弱な光を照射し、ステージ上部にカメラを設置して得られる動画データを、コンピュータでデータ処理することで振動データを得る。また、生物にとって好ましくない条件における振動パターンを得るために、特定の波長を指定できる光源を用意し、光ファイバーを使用して体の特定部位だけをステージ上部方向からピンポイントで照射する。

本研究では、図2に示すような円領域($L = 4\text{mm}$, $H = 0.4\text{mm}$)の中に対象とする生物を設置した場合に、円領域内ではほぼ同じ振動モードを示すことから、3つの円領域を一つの振動子としてみなし、これらを細い経路で接続した格子型枠を培地上に設置し実験を行う。

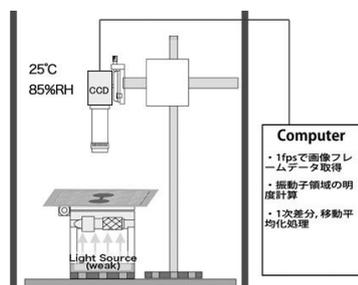


図1 振動データ計測システム。

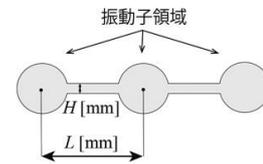


図2 格子状構造の型枠。

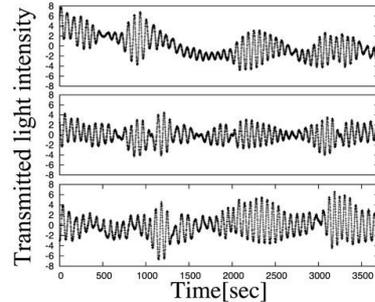


図3 厚み振動波形例 (上から1, 2, 3番目の振動子領域データ)。

(2) 振動データ解析

対象とする生物が示す振動現象は多種多様で複雑な変化を見せる。本研究では、環境適応的な行動を示す生物の動きを制御する体の厚み振動に確率的なダイナミクスを仮定するよりは、ある種の実線形ダイナミクスが関与していると仮定する。そこで、実験で得られる振動データに非線形時系列解析手法を適用して、そのダイナミクスの特徴量を抽出することを試みる。

(3) 計算モデルへの外力印加

本研究で利用する手老らにより導出された計算モデル(A. Tero, J. of Theor. Biol., vol.224, pp.553-564, 2007)は、複数の節点がある長さ情報を持つパスで結ばれるネットワークを対象とした最短経路探索手法の一つとして機能するものである。本研究では、この計算モデルに周期外力とゆらぎ成分を印加した場合の解探索過程に現れる影響を調査する。

4. 研究成果

(1) 振動データの時系列解析

図3は3個の結合振動子系を対象として観測される振動データの時系列波形例を示す。各振動子の波形から、複雑な振動パターンが現れていることが見て取れる。本研究では、このような振動データ解析として、基本的な非線形時系列解析手法を適用する。

非線形時系列解析手法を適用する場合、データの定常性が確保される必要がある。これは、計測される振動子の振動データの平均値や標準偏差の値が時間に対して不変であることに相当する。また、この非定常性がある場合、計算モデルに導入する際にはダイナミクスに大きく影響を及ぼし問題となる。一方で、対象とするモデル生物の厚み

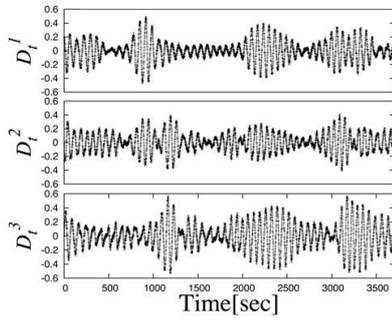


図4 図3の計測データに1次差分，移動平均処理を行った時系列波形．

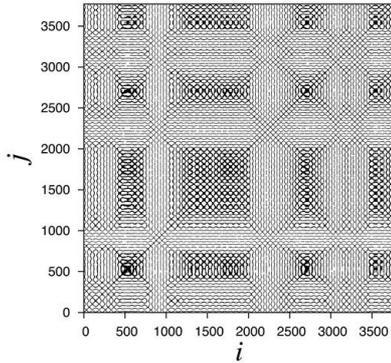


図5 図4における D_t^1 のリカレンスプロット ($r = 0.01, p = 1$)．

振動データを対象とする場合，バイアス値が時間の変化とともに変化する．この理由として，振動子領域の生物が時間とともに別の振動子領域や経路部分に移動して，円領域内の体積の変動によるものと推測される．本研究では，図4に示すように計測データの1次差分を取り，10サンプル分の計測データで移動平均処理を施した，ここで， k 番目の振動子の計測データ処理後の時系列を D_t^k ， $k = 1, 2, 3$ で表現している．図3と図4を比較すると，振動変化の様子はほぼ同一でありつつも，図4ではバイアス値の変動が除去できている．

上述の方法で得られる各振動子の振動データは，1次元のデータ列である．このような1次元データ列から，ダイナミクス状態を再構成するために，自己相関関数が最初にゼロとなる時間を遅れ時間 h として，次のように p 次元の遅れ時間系を構成する．

$$D_t = [D_t, D_{t-h}, D_{t-2h}, \dots, D_{t-(p-1)h}] \quad (1)$$

計測データのランダム性を検証するために，一辺の長さがデータ点の総数となるような2次元平面において，2個のベクトルデータ間の距離が，あるしきい値 ($=r$) よりも短い場合に平面上に点を描くリカレンスプロットで確認する．図5は $r = 0.01, p = 1$ として，図4の D_t^1 のリカレンスプロットを描いた図である．図より視覚的にプロットの様

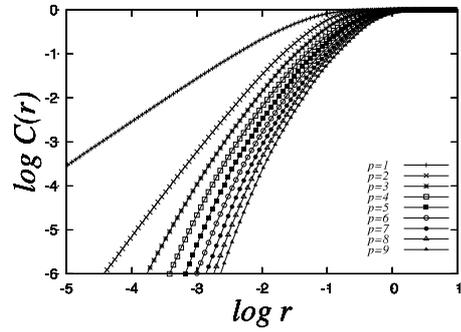


図6 相関積分 $C(r)$ ．

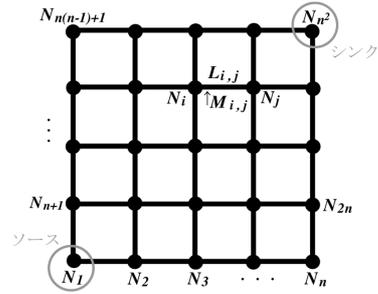


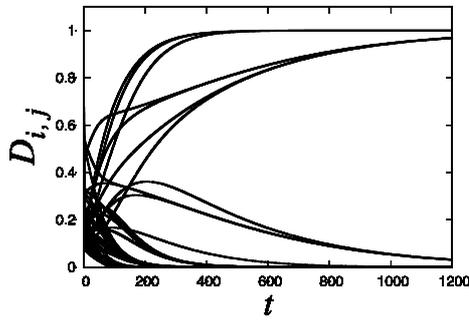
図7 2次元格子ネットワーク．

相が一様であることから，時系列データの定常性が確保されていると言える．また，平面の左下から右上に一本の線 ($L01$) に平行な線分は決定論的な系に現れやすいことが知られるが，図5においても $L01$ に平行な細切れの線が多く見られる．

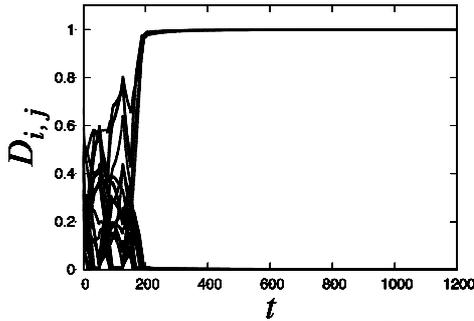
リカレンスプロットに関連して計算され，時系列データのアトラクタ次元推定等によく用いられる相関積分 $C(r)$ を計算した (図6)．ここで，様々な次元 p で相関積分を r の関数として対数軸上にプロットしている．図より p の値が大きいほど直線部分の勾配が急となり，各次元毎の曲線同士が徐々に狭まっていく様子が描かれている．曲線同士が p の値が増えても変わらなくなるように飽和する場合には，時系列データのアトラクタ次元の推定値を示唆することになる．今後，アトラクタの次元を推定するにはさらなる検証の余地が残されているものの，その足掛りが得られた．

(2) 計算モデルの外力応答

図7は $n \times n$ 個の節点 ($N_i, i = 1, 2, \dots, n$) が $2n(n-1)$ 個のパスによって格子状に結合されたネットワークの概略図である．本研究では，節点 N_i と N_j を結ぶパスとその長さをそれぞれ $M_{i,j}, L_{i,j}$ と表し，節点 N_i と N_{2n} を結ぶ2頂点对最短経路問題を対象とする．本研究では，伝導率 $D_{i,j}$ ，各節点での圧力 p_i (計算モデルにおいて現れる変数) の初期値を $[0.5, 1.0]$ の間隔に一様分布する乱数で設定した．また，各パスの長さ $L_{i,j}$ を $[1.0, 1.1]$ の間隔に分布する一様乱数で与える．本研究では主



(a) 外力なしの場合.



(b) 微小外力を印加した場合.

図8 $D_{i,j}$ の時間波形 (経路探索は全ての $D_{i,j}$ が1もしくはゼロに収束した場合に終了する).

に小規模なネットワークを対象とするが、上記のように $L_{i,j}$ を設定すると、最短経路以外にも多くの競合パスが現れる。

最初に、どの程度の外力強度が有効であるか調べるために直流成分の印加に対する計算モデルの解探索に要する時間を調査した。その結果、微小な振幅値が適当であるとの知見を得た。この結果を元に、微小な振幅を示す周期外力を計算モデルに加えたところ、外力なしの場合と比較して、最適解探索時間が短縮される結果を得ることができた。(図8)。

実際の生物実験から取得した外力データを計算モデルに適用すると、経路探索過程において求められる解が変化することがある(図9)。すなわち、外力データの振動周期やそのゆらぎ成分に由来する直流バイアスの程度によって、このような状況が生まれ得る知見を得た。

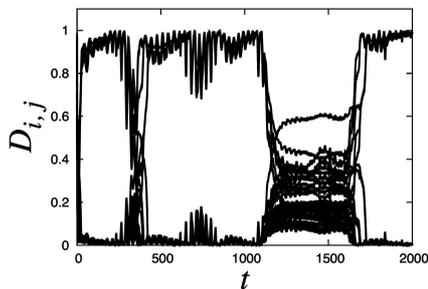


図9 計測データを外力として印加した場合の時間波形.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)(国際会議, 国内ワークショップを除く)

Kuniyasu Shimizu, Munehisa Sekikawa, Naohiko Inaba, "Experimental study of complex mixed-mode oscillations generated in a Bonhoeffer-van der Pol oscillator under weak periodic perturbation," *Chaos*, vol.25, 023105, 2015, 査読有

Doi:10.1063/1.4907741

Kuniyasu Shimizu, "Experimental Observations of Propagating Waves and Switching Phenomena in a Coupled Bistable Oscillator System," *Int. Jour. of Bifurcation and Chaos*, vol.24, pp.1-21, 2014, 査読有

Doi:10.1142/S0218127414501570

Kuniyasu Shimizu, Yuto Saito, Munehisa Sekikawa, Naohiko Inaba, "Complex mixed-mode oscillations in a Bonhoeffer van der Pol oscillator under weak periodic perturbation," *Physica D*, vol.241, pp.1518-1526, 2012, 査読有.

Doi:10.1016/j.physd.2012.05.014

[学会発表](計9件)

吉野智訓, 清水邦康, 関川宗久, 稲葉直彦, "抵抗結合された2個のBVP発振器にみられるMMO加算現象," 電子情報通信学会総合大会, 2015年3月11日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県草津市).

Kuniyasu Shimizu, Takashi Sugisawa, Kohei Odorihashi, Munehisa Sekikawa, Naohiko Inaba, "Chaotic oscillations in two coupled Bonhoeffer-van der Pol oscillators," *Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl.*, 2014年9月18日, Luzern(Switzerland).

Kuniyasu Shimizu, "Propagating waves observed in a bistable oscillator array," *Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl.*, 2014年9月17日, Luzern(Switzerland).

清水邦康, 野口貴裕, 岡部宏紀, "格子結合された真性粘菌振動データの時系列解析," 第27回路とシステムワークショップ, 2014年8月4日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県淡路市).

野口貴裕, 岡部宏紀, 本田恭士, 石崎真輝人, 清水邦康, "Three coupled biological oscillators constructed with the true slime mold and its timeseries analysis," 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013年12月7日,

City University of HongKong 香港(中国).

Kuniyasu Shimizu, Kazuki Ochiai, Tetsuro Endo, “ Transitional dynamics in a coupled oscillator system, ” Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl.,2013 年 9 月 10 日 , SantaFe(U.S.A.).

清水邦康, 落合一樹, “ 6 個の硬発振器結合系にみられる多様なスイッチング現象, ” 第 26 回回路とシステムワークショップ, 2013 年 7 月 29 日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県淡路市).

高木直広, 清水邦康, “粘菌を模擬したネットワーク最適化手法の外力に対する応答,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 2013 年 3 月 15 日, 千葉大学(千葉県千葉市).

Toshiya Hatanaka, Kuniyasu Shimizu, Yutaka Haga, “ Bursting oscillations in a memristor-based dynamic model, ” Int. Sympo. on Nonlinear Theory & its Appl.,2012 年 10 月 26 日 , Majorca(Spain).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

清水 邦康 (SHIMIZU, Kuniyasu)

千葉工業大学・工学部・助教

研究者番号 : 10409451