

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：13201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K03730
研究課題名（和文）自発的パラメータ調整機能を有する環境適応型移動運動モデルの提案

研究課題名（英文）Emergence of locomotion through autonomous parameter tuning

研究代表者
上田 肇一（Ueda, Keiichi）

富山大学・学術研究部理学系・教授

研究者番号：00378960
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：結合振動子系から得られるノード変数の情報から結合係数を推定する力学モデルを提案した。目標軌道と学習後の軌道の差を小さくする学習アルゴリズムに加えて微小なカオス外力を組み合わせることで、高い精度によるパラメータ推定を実現した。また、流体モデルに対してパラメータ自動調整モデルを提案し、環境に応じて適切なパラメータが自動的に調整され、安定した流れが自発的に生成される現象を数値的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
パラメータを自動的に調整するアルゴリズムの提案により、ロコモーションの創発機構の数理的理解に貢献できると考えている。また、提案モジュールは自律分散処理によるロボット制御に応用されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We proposed a model for estimating coefficients in coupled oscillator systems. We demonstrated that the model decreases the difference between the target orbit and the current orbit. Additionally, the model's performance is improved by incorporating a small chaotic external force. Furthermore, we proposed a parameter tuning model for fluid dynamics. The model automatically adjusts the parameter values according to the environment and exhibits the spontaneous generation of a stable unidirectional flow.

研究分野：応用数学

キーワード：自律分散システム 自己組織化 ロコモーション

1. 研究開始当初の背景

生命システムはマイクロレベルの化学反応系の機械的な組み合わせによるマクロレベルの機能発現に加え、環境変化に対する適切な制御を実現している。そのような自発的な適応性を実現する仕組みは適切なフィードバック機構によって実現される。そのため、機能創発機構を理解するためには、化学反応系が機能を発現する仕組み(マイクロからマクロ)の理解に加えて、機能が化学反応系を変化させる仕組み(マクロからマイクロ)の理解が必要になる。しかし、後者は機能という少数自由度ダイナミクスからマイクロレベルの多数のパラメータ値を制御するという困難さから十分には理解されていないのが現状である。研究代表者はマクロからマイクロの制御の実現可能性を探求するために、同期振動システムの創発現象の研究を行い、結合振動子系においてはマクロからマイクロへの方向の制御が可能であることを示した。実際、結合係数の符号や振動数などのパラメータの自動制御によって自発的に同期振動現象が発生する数理モデルを提示することに成功した[K.-I. Ueda, Phys. Rev. E, 100, 032218 (2019)]。蔵本モデルに対して行ってきた研究を流体现象や反応拡散系に対して応用可能な形で発展させることにより移動運動システムの自己組織化を実現することができるという着想に至った。

2. 研究の目的

未知の環境に適応するシステムを構築するためには、環境に応じたシステム-環境間の入出力関係をあらかじめ準備することができないため、環境に適した入出力関係を自発的に生成する必要がある。さらに、その入出力関係の記述においても外部環境に関わる変数を用いることができないという困難がある。したがって、この困難の本質的解決には、「システム-環境間の入出力関係を決定するアルゴリズムを外部環境の変数に依存しない形で記述すること」が課題となる。

人が未知の環境下に置かれた場合には、感覚器から送られる情報を脳で解釈し、適切な出力を決定する。すなわち、入出力関係は脳内ダイナミクス「のみ」によって適宜決定されると解釈することができる。そのような情報処理機構の理解により、生命システムが有する環境適応性の仕組みを解明できると期待する。本研究の問いは「システムと環境間の入出力関係を自発的に決定する数理モデルを作成することは可能か?」、及び「機能というマクロ状態がシステム内部のマイクロ状態(複数の内部パラメータ)の制御を可能にするための条件は何か?」である。

3. 研究の方法

上記の問いに対する具体的対象として流動システムを考え、本研究では以下の2つの課題に取り組んだ。

課題1: 管内の流体ダイナミクスに対するパラメータの自動調整

システム内部ダイナミクスによってシステムパラメータ調整を実現するためには、流動という機能の状態とパラメータ調整アルゴリズムの間にフィードバックを働かせ、系全体を適切な状態に遷移させる必要がある。そのために、流動モデルとパラメータ調整モデル間のループ状相互作用モデルを考える。特に、広く研究されている、数理モデルのパラメータサーチによる流動の再現とは逆過程にあたる、機能(マクロ状態)が複数の内部パラメータ(マイクロ状態)を調整する仕組みに着目したパラメータ調整アルゴリズムについて考える。また、流体モデルの内部パラメータに対してパラメータ調整アルゴリズムを組み込むことにより、環境に応じたパラメータ調整が実現されることを数値実験により確認した。

課題2: 環境適応型移動運動システムの創発条件の解明

パラメータ調整モデルを偏微分方程式によって記述することで、適切なパラメータ選択は、パラメータ調整機能付き流体モデルの解が安定状態に収束することによって実現される。したがって、適切なパラメータ調整の安定性は、システムの定常解の安定性によって評価可能である。そこで、パラメータ調整をパラメータ空間における確率密度の時間発展を記述する反応拡散レプリケータモデル(偏微分方程式)を用いて再現した。

4. 研究成果

結合振動子モデルにおけるパラメータ推定モデル

移動運動システムにおけるパターン生成として用いられる結合振動子ネットワークの結合係数を推定する自律分散モデルについて考察した。本研究で提案したモデルは、振動子ネットワークモデルと同一のネットワーク構造を有する学習システムからなり、学習システムのノードは対応する振動子ネットワークの振動子から信号を受け取る(図1(a))。数値実験の結果、ネットワークの結合係数を淘汰アルゴリズムにより変化させることで、振動パターンを再現することに成功した(図1(b))。一方、本研究で用いた振動子ネットワークモデルでは、並進対称性に起因する最適解の連続的な存在によりパラメータ推定の精度が低いことが明らかとなった。そこで、振動子ネットワークモデルおよび学習システムに対して同一のカオス軌道を外部摂動として振動子に加えるモデルを提案した。外部摂動強度をコントロールパラメータとして数値実験を行い、摂動強度と推定精度向上の関係性について考察した。その結果、外部摂動の強度を適切に与えることによって推定精度が向上することが明らかになった。

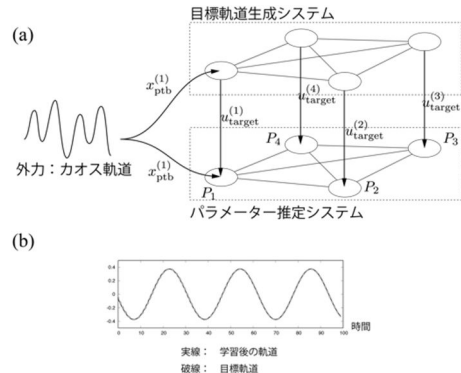


図1: モデルの概要

管内の流体ダイナミクスに対するパラメータの自動調整

管内における自発的な流動を実現ために、管半径、及び摩擦の時間周期的変動を考慮したモデル、及びモデルに含まれるパラメータを自動的に調整させるアルゴリズムを提案した。

このモデルにおいては、管半径と摩擦の振動の位相差が流量に影響することを確認した。さらに、提案アルゴリズムにより、適切な位相差が自動的に選択され、安定した流動が発生することを数値的に示した(図2)。

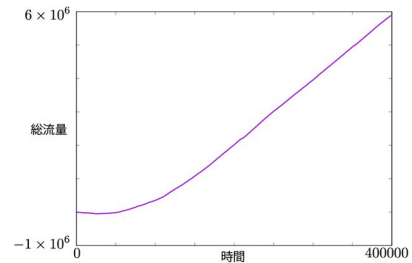


図2: 数値実験結果

パラメータ自動調整に対する連続モデルの提案

上記で提案したパラメータ自動調整モデルでは、淘汰モデルによりパラメータを更新させている。パラメータの時間変化の安定性条件を理論的に求めるために、淘汰モデルによる更新と定性的に同じ効果を示す連続モデルの導出を試みた。反応拡散レプリケータモデルを採用することにより、パラメータ調整ダイナミクスの安定化を反応拡散レプリケータモデルが示す局在パターンの安定化によって表現することを数値的に確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 上田 肇一
2. 発表標題 結合振動子系のパラメータ推定
3. 学会等名 応用数学合同研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keiichi Ueda
2. 発表標題 Emergence of synchronized oscillations by self-tuning of parameters
3. 学会等名 ReaDiNet 2021: An Online Conference on Recent Topics in Reaction-Diffusion System, Biology, Medicine and Chemistry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田 肇一
2. 発表標題 経路探索モデルを活用したロボットアーム制御への試み
3. 学会等名 日本数学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------