

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 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：2013～2016

課題番号：25400199

研究課題名(和文) 自己修正機能を有する自律分散システムの数理モデル作成とその数理解析

研究課題名(英文) Mathematical analysis for autonomous systems with self-recovery properties

研究代表者

上田 肇一 (Ueda, Keiichi)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・准教授

研究者番号：00378960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 忌避物質が含まれた領域を通過中の真正粘菌に対して時間周期的光刺激を与える実験を行い、10分周期の光刺激の場合に特徴的に、光刺激がない場合と比べて忌避物質の通過時間が短縮されることを発見した。本研究では、「抑制後リバウンド」という現象に注目することによって、実験で観察された現象の仕組みを解明した。

(2) ネットワーク内の2点をつなぐ経路を探索するシステムを提案した。提案したシステムはネットワークの切断等の外部摂動が生じた際にも自動的に新たな経路を探索する機能を有する。このような機能を有するために、ノードダイナミクスを記述する方程式が満たすべき条件を示した。

研究成果の概要(英文)：(1) We proposed a mathematical model for cell movement in amoeba. We successfully reproduced the stimulation-induced differentiation of behavioral types, which was observed experimentally. These dynamics may be explained by a saddle structure around a canard solution. Our result imply that the differentiation of behavioral types in amoeba is modified step-by-step via the compounding of stimulation inputs.

(2) We proposed a continuous model for a pathfinding system. The proposed model autonomously finds a path connecting two specified vertices, and the path is represented by a stable solution of the proposed model. The system has a self-recovery property, i.e., the system can find a path when one of the connections in the existing path is suddenly terminated. Further, we demonstrate that the appropriate installation of inhibitory interaction improves the search time.

研究分野：非線形現象の数理解析

キーワード：数理モデル 真正粘菌変形体 自律分散システム

1. 研究開始当初の背景

従来の研究では、真正粘菌の移動運動に関する数理モデルを作成し、忌避物質に対する細胞の応答を実験と数理モデルで比較することにより、細胞運動の数理機構を解明する試みを行ってきた。粘菌の基本的な行動(通過、反転)の数理機構については理解が進んできたが、実験において観察される複雑な行動パターンについてはその数理機構が解明されていなかった。真正粘菌は脳のような情報を統合するような器官が存在しないため、真正粘菌の行動原理を理解するためには自律分散システムの枠組みで数理モデルを作成する必要がある。したがって、上記のような複雑な移動運動は自律分散システムにおけるアトラクタ遷移として理解する必要がある。自律分散システムのアトラクタ遷移の数理機構を解明することにより、モジュールロボットの作製や脳における情報処理機構の解明への応用が期待される。

2. 研究の目的

生命現象の特徴である自律分散システムによる機能の発現機構を理解するためには、自己組織化パターン同士の相互作用ネットワークの数理機構の解明が不可欠である。本研究では、複数の自己組織化パターン、および空間スケールが異なる自己組織化パターンの相互作用を解析する手法を開発し、真正粘菌で観察される遷移ダイナミクスの発生機構を解明することによって、実際の生命現象で観察される機能的振る舞いの仕組みを解明する。さらに、そこで得られた知見をもとに、自己修正機能を有する自律分散システムの設計法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 真正粘菌の複雑な行動パターンの数理機構の解明

真正粘菌が示す複雑な行動パターンの数理機構を解明するために、複数の外力を加えた際に示す応答に対して数理解析を行う。偏微分方程式による数理モデルを直接解析することは困難であるため、現象を定性的に再現する常微分方程式モデルの導出とその解析を行う。常微分方程式への簡略化の正当性を確認するために偏微分方程式の数値実験を並行して行う。

【偏微分方程式モデルの作成】

先端部の伸展運動に対しては時間周期振動を示す Smith モデル、原形質流動は Darcy 則を用いて記述する。光強度と光照射周期をコントロールパラメータとし、光刺激に対する細胞の応答を再現する。

【先端運動の運動を記述する微分方程式に対する数理解析】

予備実験により、光刺激を時間周期的に与えることにより、忌避物質の存在領域におけ

る移動速度が増加する可能性があることが発見された。これは、通常、光刺激が移動運動の活動を抑制することから直感に反する結果である。この現象を理解するために、post-inhibitory-rebound (PIR) と呼ばれる効果に注目する。PIR はカナル分岐点近傍で特徴的に見られる現象であるため、モデル方程式のパラメータを決定するために先端運動のモデル方程式に対する分岐構造解析を行う。

【自己組織化パターン同士の相互作用による環境適応的行動の再現とその数理解析】

真正粘菌の伸展運動に対する偏微分方程式モデルを空間 2 次元版に拡張し、管形成を記述する数理モデルと融合させる。先端局在パターンと管構造の相互作用を考慮に入れることによって、管構造の生成・崩壊と運動した、環境適応的な移動運動を再現する。数理解析の数値シミュレーション手法として有限要素法を採用する。また、管形成を記述する離散ネットワークモデルと伸展運動に関わる偏微分方程式の相互作用の記述手法を開発する。

(2) 自己修正機能を有する自律分散システムの提案

集団振動子モデルを用いて相互作用ネットワークを構成し、力学系の吸引領域を自己修正するシステムを作成する。

(i) 自発的な経路の発見を可能にするためには、高次元相空間内を解が経巡る振る舞いが必要である。そのため、集団振動子の同期クラスター非クラスター遷移点近傍にパラメータを設定することで、遷移的に解が経巡る状態を実現する。

(ii) ノードダイナミクスの非線形性を工夫することによって、予期せぬネットワークの切断、スタート・ゴール点の変更に対してシステムが新たな吸引領域を再生成することを可能にする。

(i) 及び (ii) の性質により、提案する数理モデルは、環境変化が発生した後に確実に新たなアトラクタを発見することが可能になる。

4. 研究成果

(1) 真正粘菌の複雑な行動パターンの数理機構の解明

生物実験グループと共同研究を実施し、忌避物質が含まれた領域を通過中の真正粘菌に対して時間周期的光刺激を与える実験を行ったところ、10 分周期の光刺激の場合に特徴的に、光刺激がない場合と比べて忌避物質の通過時間が短縮されるという興味深い実験結果を得た(図 1)。従来、光刺激は真正粘菌にとっては抑制的な効果があると考えられていたため、この結果は直感に反する。そこで、従来、真正粘菌のモデルでは考慮されていなかった、「抑制後リバウンド」という

緩和振動子に特徴的にみられる現象に注目することによって、実験で観察された現象の数理機構の解明を試みた。

現象を数理的に解明するためには、粘菌の伸展運動を再現する数理モデルを作成する必要がある。先端部の伸展運動に対してはカルシウムイオン濃度変化を記述する方程式、原形質流動に対しては Darcy 則に基づく方程式を採用し、それらを相互作用させた偏微分方程式によるモデルを導出した。

導出した数理モデルを用いて数値実験を行った。光強度と光照射周期をコントロールパラメータとし、光刺激に対する細胞の応答を調べた結果、伸展運動のダイナミクスが示す振動の周波数と光刺激の周波数が近いときに、抑制後リバウンド現象が顕著に観察され、忌避物質が含まれた領域の通過時間が短縮されることが明らかになった(図1)。この数値実験結果により、粘菌が光刺激に対して伸展運動を活性化させる仕組みとして細胞先端で起きる化学反応の非線形性が重要な役割を果たしていることが示された。

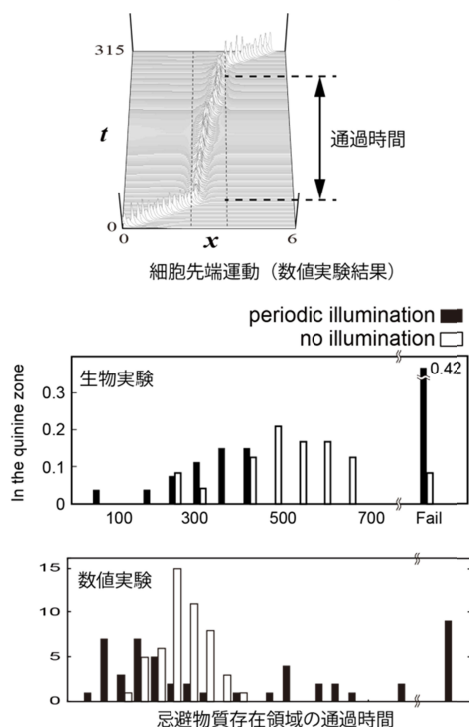


図 1: (上) 細胞先端の移動運動 (数理モデル)。点線で囲まれた部分が忌避物質の存在領域。(下) 忌避物質領域の通過時間の分布。

(2) 自己修正機能を有する自律分散システムの提案

自己修復機能を再現する自律分散システムを構築するためにネットワーク上での力学系を研究した。本研究では、4つのモデルを提案した。

(モデル 1) ネットワーク内のループ構造を探索するモデルを提案した。ネットワークの

ノード上に集団振動子を配置し、エッジの向きに応じて集団振動子同士の相互作用を仮定する。集団振動子の内部ダイナミクスがある条件を満たせば、提案したモデルは次のような性質を持つ。(i) 解となるループ構造は、該当するノード上の集団振動子が同期振動し、該当しないノード上の集団振動子が非同期振動する状態として表現される。(ii) (初期値が適切であれば) ネットワーク内にループ構造を自発的に発見する。(アトラクタに収束する) (iii) ネットワークの変化によりこのループネットワークを自動的に発見すること、およびループネットワークが切断した場合に自発的に新たなループネットワークを探索する。(iii)の性質を実現するために、PIR 現象を利用した。

(モデル 2) ノードダイナミクスを 2 変数常微分方程式で記述することにより、モデル 1 の変数の数を減少させることに成功した。これにより、モデル 1 より短時間でループ構造探索が可能になった。数理モデルのヌルクラインの形状を工夫し、複数の ON 状態と OFF 状態を実現することで、従来のモデルよりも複雑な制御が可能となり、モデル 1 の (iii) で示したような自己修復性を実現することが可能になった。

(モデル 3) モデル 1 ではネットワークノードの数の増加に対して探索時間が急速に増大するという欠点があった。そこで、モデル 1 の改良を試みた。ノード間の相互作用を一方方向結合から双方方向結合に変更し、さらに、ノード内ダイナミクスを適切に設定することにより、探索速度を大幅に減少させることに成功した。

(モデル 4) モデル 1 から 3 のループ探索モデルを発展させ、ネットワーク内の 2 点をつなぐ経路を探索するシステムを提案した。ネットワークのノードダイナミクスとしてモデル 2 で提案した方程式を採用した。作成したシステムはネットワークの切断等の外部摂動が生じた際にも自動的に新たな経路を探索する機能を有する(図2)。さらに、モデル 3 で提案した仕組みと同様の仕組みを組み込むことによって、経路探索時間を短縮することに成功した。

モデル 1 から 4 では一般的なネットワーク上におけるダイナミクスを考察したが、ネットワーク構造を適切に与えることによって工学で現れるロボットアームのジョイントの位置決定に関するある逆問題へ適用可能であることが明らかとなった。提案したモデルは自律分散システムであるため、今後、並列計算の新技术として理論を発展させる計画である。

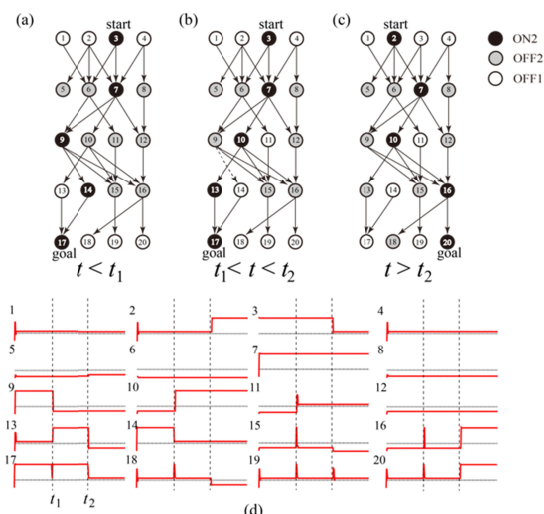


図 2 : (a)パスの発見。(b)ノード 9 とノード 14 の間のパスを切断した後の新たなパスの発見。(c)スタート点とゴール点の位置を変化させた後の新たなパスの発見。(d)ノードの ON-OFF 状態遷移。

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 4 件)

Ueda, Kei-Ichi, Masaaki Yadome, and Yasumasa Nishiura. "Multistate network model for the pathfinding problem with a self-recovery property." *Neural Networks* 62 (2015): 32-38.

<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.08.008>

Ueda, Kei-Ichi, et al. "Bidirectional Wave Propagations Can Improve Loop Finding Time." *Advances in Cognitive Neurodynamics (IV)*. Springer Netherlands, 2015. 277-282.

10.1007/978-94-017-9548-7_39

Ueda, Kei-Ichi, Masaaki Yadome, and Yasumasa Nishiura. "Multistate network for loop searching system with self-recovery property." *Physical Review E* 89.2 (2014): 022810.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.022810>

Ueda, Kei-Ichi. "Three-state network design for robust loop-searching systems." *Physical Review E* 87.5 (2013): 052920.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.052920>

[学会発表](計 13 件)

Kei-Ichi Ueda, Multistate network model for the pathfinding problem, The 2nd Joint Workshop of A3 Foresight Program, Xiamen Golden Bay Hotel, 2015-11-28

Kei-Ichi Ueda, Differentiation of behavioral type induced by environmental variations in an amoeba, 8th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, China National Convention Center, 2015-08-11

Kei-Ichi Ueda, A Continuous Model for the Pathfinding Problem with Self-Recovery Property, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird Ski and Summer Resort, 2015-05-18 - 2015-05-18

上田 肇一, 自己修復機能を有する自律分散システムとその経路探索問題および逆運動学への応用, 応用数学合同研究会, 龍谷大学, 2014-12-20

Kei-Ichi Ueda, Nonlinear dynamics in decision making process in amoeboid locomotion, JSMB/SMB201, 大阪国際会議場, 2014-07-31

上田 肇一, 真正粘菌の行動選択に対する数理的アプローチ, 北陸応用数理研究会 2014, 金沢大学サテライトプラザ, 2014-02-14

上田 肇一, 柔軟なアトラクタ遷移を可能にする大自由度力学系研究会「富山解析セミナー 2013」, 富山大学理学部, 2013-10-05

Kei-Ichi Ueda, Transient dynamics of neural oscillators induced by nonlinear interactions, International conference on cognitive neurodynamics 2013, Sigtuna foundation, スウェーデン, 2013-06-24

Kei-Ichi Ueda, Three-state Node Network for Loop Searching System, IMA Special Workshop Joint US-Japan Conference for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systems, Minnesota University, アメリカ合衆国 2013-06-13

Kei-Ichi Ueda, Loop Searching System with Self-Recovery Property, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird Ski and Summer Resort, アメリカ合衆国, 2013-05-20

[図書](計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

6．研究組織

(1)研究代表者

上田肇一（Keiichi Ueda）

富山大学・大学院理工学研究部（理学）・

准教授

研究者番号：00378960