

令和元年5月22日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0015

研究課題名(和文) 進化経済学と工学をハイブリットする統合ダイナミクスの探求

研究課題名(英文) Toward the integrated dynamics that connect evolutionary economics and engineering

研究代表者

久保 英夫 (Kubo, Hideo)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：50283346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：我々は経験や成功体験に基づいた習慣やルーチンに従って行動しているが、外部環境の変化により、通常用いている戦略の変更を余儀なくされることがある。そうした外的な刺激に適応するメカニズムはトップダウン的ではなく、ボトムアップによるものであると考えられるが、それを数理科学的手法によって研究した。特に「昆虫が刺激をどの様に処理して行動に活かしているのか」に学び、即時的な適応を可能とするメカニズムを解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数理科学、ロボット工学、情報科学、生物学など諸科学の研究者が連携し、各分野の知見を融合することにより本研究は進められた。課題を一つの分野だけで解決することは難しくなっており、分野横断的な研究の重要性が増す中、このような共同研究を展開できたことの学術的意義は高い。また、我々が無意識下で行っている即時適応のメカニズムが解明されれば自閉症スペクトラムや再生医療への応用も期待でき、社会的意義も有している。

研究成果の概要(英文)：Our personal behavior is conducted by the custom and routine of ourselves based on our experience and/or success stories. But in some cases, we are forced to change the usual strategy due to the change of the external circumstances. We studied such an adaptation to the stimuli from the outside world should not be designed by the top-down mechanism but by the bottom-up mechanism, in the framework of Mathematical analysis. In particular, we analyzed the immediate adaptation by following the way of information processing used by insects.

研究分野：数理科学

キーワード：ルールダイナミクス ケーブル理論 発達ロボティクス 進化経済学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

#### 1. 研究開始当初の背景

生物の行動や計算機の作動に関する指導原理として「学習によって獲得したアルゴリズムを適用する」という考え方は最もわかりやすいものと思われる。一方で、深層学習に代表されるようにビッグデータを解析することにより、自律的に学習するメカニズムやデータ駆動型の概念抽出についての研究が盛んに行われている。しかしながら、生物の行動の中には即時的な反応を求められるものが少なくなく、大量のデータを解析して、そこから指導原理を導くことによって全てを説明できるとは思われない。また、情報学においても計算限界が問題視されており、例えば、自然を直接的に利用して計算を行うナチュラル・コンピューティングという手法への注目が高まっている。このような流れの中で、本研究では指導原理自身が時間とともに変化することを許すような数学的枠組を構築することを想起した。

#### 2. 研究の目的

人の行動に係わるような複雑な現象を捉えるには、ルール自体が時間とともに変化するような枠組を作る必要がある。そこで、ルール生態系ダイナミクスを精査し、その本質をランダム結合振動型力学系と比較・検討し、複数の力学系の結合の仕方とその各結合に対する評価関数の構造を数学的に定式化する。これにより、これら具体的な力学系の上位概念として、より普遍的な統合ダイナミクスを構築する。更に、そのダイナミクスにおいて、各力学系間の相互作用を有向グラフに表現することによりグラフ理論を適用することが可能となるので、代数学的に統合ダイナミクスの対称性を抽出することを目指す。一方で、発達ロボティクスにおいて、トップダウン型のプログラミングに頼らない、しなやかな制御が求められている。そこで、評価関数を上手く設定することにより、各パーツ間の制御を司るルール自身が変化するような統合ダイナミクスの実装の提案を目指す。

#### 3. 研究の方法

ルール生態系ダイナミクスの定式化に関する数学的背景を理解し、その応用の可能性について検討する。基本的には、リプリケータ・ダイナミクスと類似なものだが、ルールの重要性を表す指標であるメタルールの存在がこのダイナミクスを、マイクロ・メゾ・マクロの階層構造を持つ興味深いものとしている。先行研究では、未知関数に付加的な条件が課されており、また、メタルールの一般化に関する十分な検討には至っていない。そこで、そのような付加的な条件を取り除くと共に、より一般的なメタルールを設定した場合の解の漸近挙動について解析する。更に、グラフ理論を適用し、より普遍的な数理構造の抽出を試みる。

自律的な動作を行うことのできる、ヒトと同等の筋骨格構造を持つヒト型ロボット・アームを試作する。そのために、力覚や自己受容感覚を観測することができるセンサ類を取り付け、実際に動作を行う際にどのようなデータが得られるのかを調査する。と同時に、自律的な動作の生成に欠かせないボディ・イメージについて、ヒトがそれをどのように獲得するのかについて検討する。具体的には、筋骨格などの身体的な拘束条件のもとで、ボディ・イメージについての情報が如何に自己組織化され、それがどのように学習されるのかを、例えば、自己組織化マップを用いた定式化の可能性を追究する。

#### 4. 研究成果

我々は、必要に応じて機能分化し、状況に応じて即時適応するシステムの数理構造の探求を目指している。具体例として、このようなメカニズムを内包するロボットアーム

を構築するためには、ヒトの筋骨格にみられるような物理的な拘束に加えて、ヒトと同様に感覚受容器からの情報をフィードバックすることによる制御を行わなければいけない。感覚受容器からの情報として、筋骨格を模倣するために使用されるチューブの物性やロボットアームが動作する際にチューブにかかる張力などを計測するための装置を構築した。これらの装置をベースとして計測データをロボットアームの動作へとフィードバックするシステムに繋げていく準備を整えることができた。

ロボットアームの製作自身も重要な課題であるが、その数理構造を抽出するという観点からは「外界からの様々な拘束条件のもとで生じる自己組織化現象を如何に定式化するか」が本質的な問いであると言える。これについては、例えば、情報量がある制約を満たした上で相互情報量の最大化を実現する状況を具体的に検討することによって解決の糸口が見出せそうな段階に達している。また、自己組織化マップの考え方をそこに融合させる可能性についても検討を加えた。

更に、ルール生態系ダイナミクスに関する数学的背景を理解し、その応用の可能性について理解を深めた。ルール生態系ダイナミクスにおける制御は、評価関数がメタルールを通して評価されることで、評価関数自身が時間発展していくことにより実現されているが、この枠組みを我々の問題に落とし込むとすれば、評価関数の時間発展は、拘束条件からの制約を受けることにより誘起されることになる。そのようなダイナミクスを構成するための具体例として、アリが巣仲間以外のアリと遭遇すると、反射的に攻撃行動に出るという即時適応のメカニズムについて研究した。アリの嗅覚は、一つのユニットが100本の神経細胞の束によって構成されており、それらの神経細胞の間に散見される瘤によって電気的相互作用が生じている可能性があるとの知見を得ている。その効果により外部からの小さな刺激はより弱い情報に変換され、通常とは異なる刺激パターンは強い情報に変換される状況が実現できれば意思決定を迅速に行えるようになる。こうした即時適応に必要となる、情報の二値化を強化するような数理モデルの構築に取り組み、ケーブル理論に基づきある常微分方程式系を考案し、その数値シミュレーションを行った。パラメータを上手く調整することで、上述のような機能を持つ数理モデルを得ることができ、下記の[雑誌論文]として発表した。ただし、その時点では、入力信号は定常状態にあるものとして取り扱ったが、アリの匂いは複数の炭素化合物が混合されたもので構成されており、また、各神経細胞の受容器は複数の炭素化合物に反応してしまうため、より現実に近い状況に近づけるためには動的な入力信号を扱う必要がある。そこで、こうした点を考慮した数理モデルを新たに構築した。

一方で、ヒトの即時適応のメカニズムを考察するために、より長い時間スケールでのシステムを記述するものとしてルールダイナミクスに着目した。このダイナミクスにおける制御ではルールがメタルールを通して評価されることで、ルール自身が時間発展することに特徴があり、準安定状態からの遷移を表現することも可能である。ヒトと同様に感覚受容器からの情報をフィードバックすることが可能なロボットアームへの実装を念頭に、この数理モデルをルール生態系ダイナミクスと統合する形で研究が発展している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15件)

S. Sawada, S. Settepanella and S. Yamagata, Pappus's Theorem in Grassmannian  $GR(3, C^n)$ , *Ars Mathematica Contemporanea*, 査読有, 16巻, 2019, 257-276, <https://amc-journal.eu/index.php/amc/article/view/1619/1348>

- Y. Takeichi, T. Uebi, N. Miyazaki, K. Murata, K. Yasuyama, K. Inoue, T. Suzaki, H. Kubo 他, Putative Neural Network Within an Olfactory Sensory Unit for Nestmate and Non-nestmate Discrimination in the Japanese Carpenter Ant: The Ultra-structures and Mathematical Simulation, *Front. Cell. Neurosci.* 査読有, 12巻, 2018, 1-15, DOI: 10.3389/fncel.2018.00310
- A. Libgober and S. Settepanella, Strata of discriminantal arrangements, *Journal of Singularities* Volume in honor of E. Brieskorn, 査読有, 18巻, 2018, 441-456, <https://arxiv.org/abs/1601.06475>
- A. Hitzmann, H. Masuda, S. Ikemoto, and K. Hosoda, "Anthropomorphic Musculoskeletal 10 degrees-of-freedom Robot Arm driven by Pneumatic Artificial Muscles", *Advanced Robotics*, 査読有, Volume 32, Issue 15, 2018, 865-878, <https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1494040>
- D. Yu, S. Ikemoto, and K. Hosoda, "Optimal Feedback Control Based on Analytical Linear Models Extracted from Neural Networks Trained for Nonlinear Systems", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 査読有, 2018, 8689-8694, <https://doi.org/10.1109/IRoS.2018.8593507>
- K. Takahara, S. Ikemoto, and K. Hosoda, "Reconstructing State-Space from Movie Using Convolutional Autoencoder for Robot Control", *Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-15)*, 査読有, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01370-7\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01370-7_38)
- H. Masuda, S. Ikemoto, and K. Hosoda, "Common Dimensional Autoencoder for Identifying Agonist-Antagonist Muscle Pairs in Musculoskeletal Robots", *Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-15)*, 査読有, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01370-7\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01370-7_26)
- Xiangxiao Liu, Andre Rosendo, Shuhei Ikemoto, Masahiro Shimizu, and Koh Hosoda, Robotic investigation on effect of stretch reflex and crossed inhibitory response on bipedal hopping, *Royal Society Interface*, 査読有, 15巻, 2018, <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0024>
- Shuhei Ikemoto, Fabio DallaLibera, and Koh Hosoda, Noise-modulated Neural Networks as an Application of Stochastic Resonance, *Neurocomputing*, 査読有, 277巻, 2018, 29-37, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.12.111>
- Hideo Kubo, Note on the body-image toward its mathematical modeling, *Hokkaido University technical report series in mathematics*, 査読無, 172巻, 2017, 11-17, <http://doi.org/10.14943/81533>
- S. Sawada, S. Settepanella, S. Yamagata, Discriminantal Arrangement,  $3 \times 3$  Minors of Plucker Matrix and hypersurfaces in Grassmannian  $Gr(3, n)$ , *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I*, 査読有, 355巻, 2017, 1111-1120
- Shouhei Shirafuji, Shuhei Ikemoto, Koh Hosoda, Designing Noncircular Pulleys to Realize Target Motion Between Two Joints, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 査読有, Volume 22, Issue 1, 2017, 487-497, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2614961
- Pauline Baillet, Simona Settepanella, Homology graph of real arrangements and monodromy of Milnor Fiber, *Advances in Applied Mathematics*, 査読有, volume 90, 2017,

46-85, <https://doi.org/10.1016/j.aam.2017.04.006>

Giovanni Dosi, Marco Grazzi, Luigi Marengo, Simona Settepanella, Production theory: accounting for firm heterogeneity and technical change, Journal of Industrial Economics, 査読有, 64巻(4), 2016, 875-907, DOI: 10.1111/joie.12128

[学会発表](計 31件)

J. Takano, T. Omori, H. Kubo, T. Uebi, Y. Takeichi, N. Miyazaki, K. Murata, K. Yasuyama, K. Inoue, N. Kajimura, M. K. Hojo, E. Takaya, S. Kurihara, M. Ozaki, Simulation based on Neuronal Cable Theory for Structures Within an Olfactory Sensory Unit for Nestmate and Non-nestmate Discrimination in the Japanese Carpenter Ant, The 7th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer, 2019

久保英夫, Remark on Kolmogorov's superposition theorem, Mathematical Analysis of Self-Organization with Constraints, 2018

J. Takano, T. Omori, H. Kubo, T. Uebi, Y. Takeichi, N. Miyazaki, K. Murata, K. Yasuyama, K. Inoue, N. Kajimura, M. K. Hojo, E. Takaya, S. Kurihara, M. Ozaki, Simulation for Simplified Neural Network Model of Structures Within an Olfactory Sensory Unit for Nestmate and Non-nestmate Discrimination in the Japanese Carpenter Ant, INCF Japan Node International Workshop on Advances in Neuroinformatics, 2018

S. Settepanella, Discrete Morse Theory, PISA-HOKKAIDO-ROMA2 Summer School on Mathematics and Its Applications 2018 (国際学会), 2018

S. Settepanella, Multi-Factor Productivity and Evolutionary Accounting in Presence of (Persistently) Heterogeneous Firms, ISS Conference, 2018

K.Hosoda, "Soft Feel by Soft Robotic Hand: New way of robotic sensing", Max Plank Institute, 2018

K.Hosoda, "Attempts to develop artificial muscles", Workshop "Novel bioinspired actuator designs for robotics (BioAct)", 2018,

K.Hosoda, "Soft Humanoid Robotics", SAB 2018, 2018

K.Hosoda, "Non-intentional Intention", Universite Cergy Pontoise, 2018

K.Hosoda, "Anthropomorphic Robot Hand, Grasping and Recognition", SoftRobotics Workshop, 2018

Hideo Kubo, Self-organization under the interaction with surroundings, RIMS共同研究「On the principle of self-organization in genuinely complex systems」, 2017

Xiangxiao Liu, Andre Rosendo, Hirofumi Shin, Shuhei Ikemoto, Masahiro Shimizu and Koh Hosoda, A Robotic Study: The Contribution of Crossed Inhibitory Response to Stability in Biped Hopping, The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2017

久保英夫, 拘束条件による機能分化の数理モデルに関する考察, 津田一郎教授退職記念研究集会 複雑系数理の新展開, 2017

久保英夫, Overview of pattern-filtering model, Towards Mathematical Model for Self-organization with Constraints, 2016

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：細田 耕

ローマ字氏名：(HOSODA, koh)

所属研究機関名：大阪大学

部局名：基礎工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10252610

研究分担者氏名：セツテパネーラ シモーナ

ローマ字氏名：(SETTEPANELLA, simona)

所属研究機関名：北海道大学

部局名：理学研究院

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40721890

(2)研究協力者

研究協力者氏名：西部 忠

ローマ字氏名：(NISHIBE, makoto)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。