

振る舞いの多様性に基づいた適応的運動機能を 発現するロボットの開発

Development of life-like robots that generate supple, versatile, and adaptive behaviors

2021005



研究代表者

広島大学大学院 理学研究科

梅 舘 拓 也

共同研究者

広島大学大学院 理学研究科

風 間 俊 哉

【研究の目的】

本研究の目的は、プログラマーが前もって設計しておく必要があるロボットの振る舞いを、ロボットの形態や粘弾性などの力学的特性を活用することで、ロボット自身に多様な振る舞いを自発的に生成させ、環境やタスクに応じた振る舞いを自律的に獲得させることにある。申請者らは、汎用機であるロボットがわれわれの日常生活に浸透しない最大の原因は、振る舞いの設計の難解さにあると考える。一方、生物は自身の置かれた環境に応じて質的に異なるさまざまな振る舞いを発現し、自発的にそれらを切り替えることで優れた適応的運動機能を発現している。このような、多様性に基づいた適応的運動機能を自ら生み出す人工知能の開発が本研究の目的である。

上記の目的を達成するためには、生物の「振る舞いの多様性を自ら獲得し、状況によってそれらを使い分けることが出来る根源的な仕組み」を理解する必要がある、と申請者は考えた。これまで申請者は、その根源的な仕組みを理解するために、最も原初的な生物である真正粘菌変形体に着目してきた。真正粘菌変形体は振動により移動する巨大アメーバ生物であり、神経や脳などの情報処理に特化した器官を持たない単細胞生物であるが、驚くべき多様かつ適応的な振る舞いを生成する。これまでに申請者らは、

真正粘菌変形体のモデルをロボットで作ることで、多様な振る舞いを自発的に生成し、さらにはその多様な振る舞い間の遷移現象まで再現することに成功しつつあった。そこで本研究では、どのようなときに多様な振る舞いを発現し、そのようなダイナミクスがその遷移現象を収束させるのかを体系的に理解することを第一義的な目標設定とした。さらに、ここで得られた知見を別の形態をもつロボットにも応用する。ここで得られた知見にもとづき、さまざまな形態のロボットにおいて、探索行動と知識活用行動（走性、逃避など）を自律的に切り替える、「現実世界に接地した知能」を持つロボットの開発が可能になると考えられる。

【研究の内容・成果】

1. 粘菌振動子をモチーフにした振動子ロボット

申請者らは生物の「振る舞いの多様性を自ら獲得し、状況によってそれらを使い分けることが出来る根源的な仕組み」を理解するために、最低限の設定から基本理論を探るという、いわゆるミニマリストアプローチを採用し、きわめて原初的な生物である真正粘菌変形体に着目してきた（図1の左上）。真正粘菌変形体は何ら分化した（脳や神経系などの）器官を持たない多核単細胞生物であるが、多様な時空間振動パターンを形成する[1]。興味深いことに、

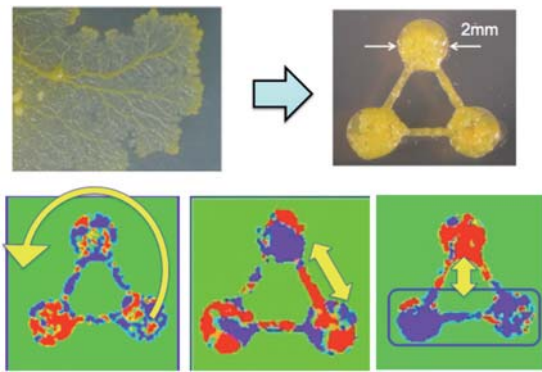


図1 粘菌が多様な振動パターンを生成する様子。粘菌により作られた振動子（上図）と、その振動子の厚み計測の結果（下図）。（早稲田大高松敦子博士のウェブページより抜粋）

これら複数の振動モードのうち一つのモードにとどまることなく、複数の振動モード間を自発的に遷移することが知られている（図1下参照）。真正粘菌変形体はこのようなメカニズムを活用することで、適応的な振る舞いを実現しているのではないかと考えられる。したがって、真正粘菌変形体には、多芸多才な運動知の原型が内在されていると考えることができ、このような知の形態を議論する上で得難いシンプルベストなモデル生物であるといえる。

申請者らは、このような多芸多才な運動機能発現の鍵となるのが、ロボットの身体部位間の力学的な相互作用（morphological computation [2]）であると考え、このような自律分散システムを工学的に実現し検証することで、真正粘菌変形体の多芸多才な振る舞いの発現機序の解明を目指してきた（研究業績1, 2）。具体的には、粘菌振動子をモチーフにした流体駆動型モジュラーロボットのシミュレーションモデル（図2(b)）とそれをもとにしたロボット実機（図2(a)）を開発してきた。シミュレーション並びに実機実験の結果、柔らかいアクチュエータにかかる張力が少なくなるように自身の運動リズムを調整するというきわめて単純な制御則が実装されているだけでもかかわらず、身体の力学的な相互作用により「多様な時空間振動パターン」と「それらの間での遷移」が確認されている（図2(c), 研究業績1参照）。さらに実

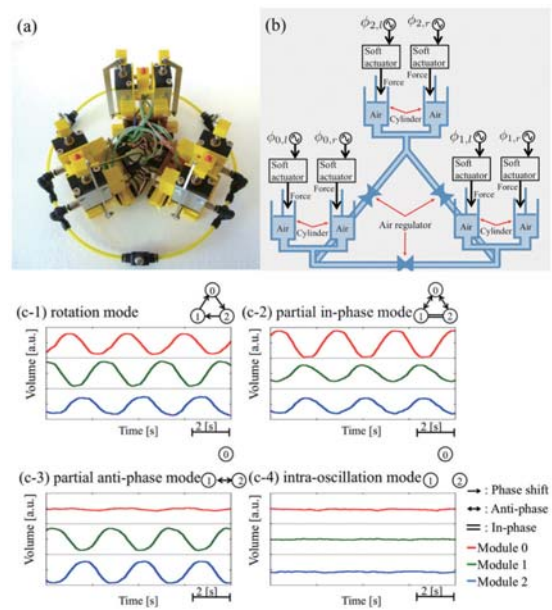


図2 (a) 粘菌振動子をモチーフにした振動子ロボット実機, (b) 粘菌振動子ロボットの模式図, (c) 粘菌振動子ロボット実機が多様な振動パターンを生成する様子

機ロボットにおいて遷移の頻度も長時間にわたって調べた。実験結果により、このシステムが生み出す多様な振る舞いは、複数のカオス的なアトラクターが共存することで生成されていることが示唆されている（研究業績2）。

2. 探索と走性を自律的に切り替える粘菌振動子モジュラーロボット

本研究では、このモデルで得られた多様な振る舞いの発現メカニズムを、ロボットの振る舞いの自律的な切り替えに応用するためにシミュレーションモデルとロボット実機を構築した。図3のようにシリンダとアクチュエータ、接地摩擦制御ユニットから構成される機械要素を1モジュールと定義する（図3(a)参照）。またこれら複数のモジュールを中央のユニットから放射状に配置し、シリンダどうしをチューブで結ぶことでロボットを構成している。モジュールには位相振動子を実装し、当該位相振動子の位相に基づいてアクチュエータを制御することで自律分散的にロコモーションを生成する。本研究では柔軟性を有したアクチュエータによりシリンダ内の空気（原形質）をモジュール間で吸

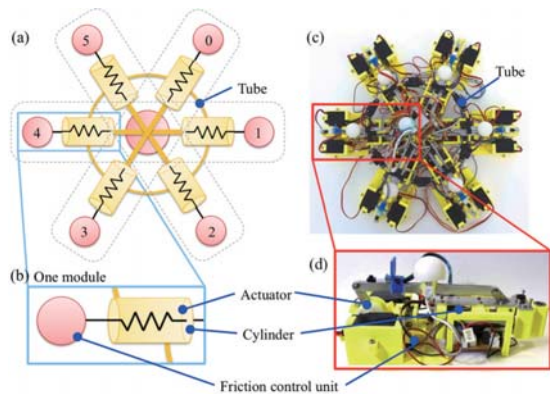


図3 (a) 粘菌子をモチーフにした粘菌振動子型モジュラーロボットの概要図, (b) 粘菌振動子型モジュラーロボットの実機

入・排出することで、原形質流動が生起されるようにモジュールを設計した。この粘菌振動子型ロボットに、移動機能（電磁石による接地摩擦制御機構）と誘引刺激の有無による弾性率変化を実装することで、明示的な誘引刺激がないときには多様な振動モードを活用して環境探索を行い、誘引刺激がある時には走性を示すという、多様な振る舞いを状況依存的に自己組織化することに成功した（報告書提出時に論文投稿中）。本ロボットは、力学的相互作用を活用した局所フィードバックを自律分散システムに実装することで、現実世界の物理法則に沿った現実的な振る舞いの中から、多彩な振る舞いを生成可能であることを示すよいモデルケースである、と申請者は考える。

3. 粘菌振動子モデルを用いたイモムシ型ソフトロボットの自律分散制御

さらに、このロボットで得られた知見を別の形態のロボットでも実現するために、イモムシ型ソフトロボットも作成している（図4, 研究業績3), 4), 動画: <https://www.youtube.com/watch?v=0pHOaBnj1po>）。このイモムシ型ソフトロボットには、コイル状の形状記憶合金を柔らかい身体に組み込み、そのリズムミクな収縮運動を制御するために粘菌振動子モデルを採用している。前述の制御則同様、やわらかいアクチュエータにかかる張力を計測し、その張力が

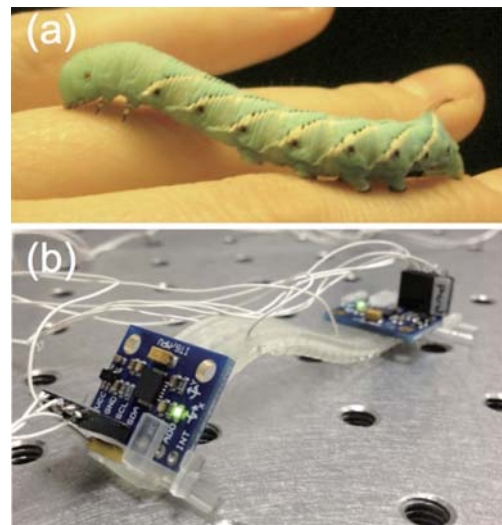


図4 (a) 一次元ひも状のシンプルな形態をもつイモムシ (*Manduca sexta*)。ソフトロボットを開発する上でのモデル生物であると考えられる。(b) 粘菌子をモチーフにした粘菌振動子を組み込んだイモムシ型ソフトロボット

減少するように局所センサフィードバックを設計した。実験結果から、振動子同士が柔らかい素材の連続的な大変形や粘弾性を介して、互いに収縮リズムを調整することで（適切な位相差を生成し）ロコモーションが生成可能なことが確認できた。この実験により、ソフトロボットを制御するための粘菌振動子の有用性が確認できた。

[今後の研究の方向・課題]

この制御則のさらに別の形態への応用先として、ヒラムシロボット（研究業績5）、図5参照）の作成にもとりかかっている。現在は与えられた位相差に対して、どのような動きを生成できるかを検証中であるが、次の段階として、粘菌振動子モデルをヒラムシ型ソフトロボットに実装した時にどのような動きが自律的に生成されるかを実機並びにシミュレーションを用いて実験し、考察したいと考えている。

さらにこの制御則の有用なものとするために、この振動子が生み出す多様な振動パターンと「さまざまな機能」をいかに結びつけてシステムをデザインするか、という体系的な設計論を

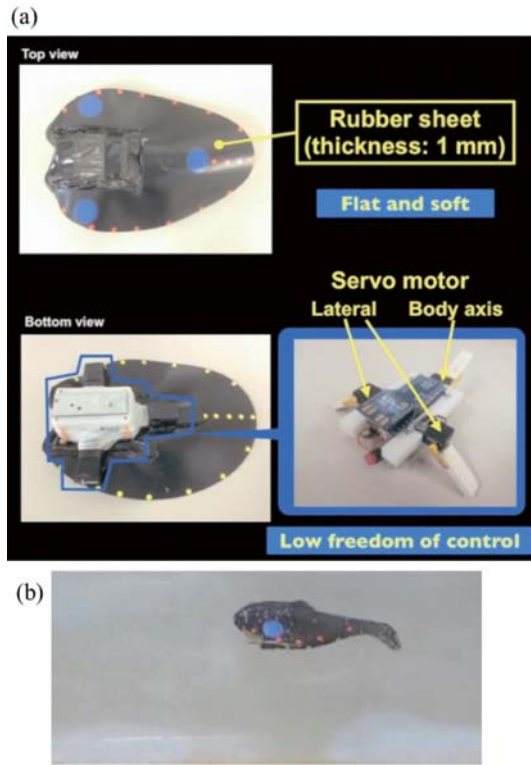


図5 (a) 風間氏と共に作成したヒラムシ型水中遊泳ロボット, (b) そのロボットが水中を遊泳する様子

構築する必要がある。具体的には、数値実験と実機実験にて、力学的な刺激（ロコモーションによる摩擦、引張・圧縮など）や各モジュール剛性の変化と、発現する多様な振る舞いの関係を考察し、その振る舞いをもとに機能を設計する。さらに、図3のロボットのような剛性変化以外にもどのようなダイナミクスがその遷移現象を収束させるのかを体系的に理解する必要がある。加えて、ここで得られた設計論を、別の形態のロボットに応用することにより、我々の日常生活で役立つ柔軟で多様な振る舞いを自ら獲得し、状況によってそれらを使い分けるロ

ボットの開発を目指す。

参考文献

- [1] A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii, and I. Endo, "Spatiotemporal Symmetry in Rings of Coupled Biological Oscillators of Physarum Plasmodial Slime Mold", Phys. Rev. Lett., Vol. 87, pp. 078102/1-4, 2001.
- [2] C. Paul, "Morphological Computation, Robotics and Autonomous Systems, Special Issue on Morphology", Control and Passive Dynamics, August 2006, 54(8) : 619-630, 2006.

[成果の発表・論文等]

- 1) T. Umedachi, R. Idei, K. Ito, and A. Ishiguro, "A Fluid-Filled Soft Robot That Exhibits Spontaneous Switching Among Versatile Spatiotemporal Oscillatory Patterns Inspired by the True Slime Mold", Artificial Life 19 : 67-78, 2013.
- 2) T. Umedachi, R. Idei, K. Ito, A. Ishiguro, "True-slime-mould-inspired hydrostatically coupled oscillator system exhibiting versatile behaviours", Bioinspir. Biomim. 8 035001, doi : 10.1088/1748-3182/8/3/035001, 2013.
- 3) T. Umedachi, B. Trimmer, "Design of a 3D-Printed Soft Robot with Posture and Steering Control", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), Hong Kong, China, May. 31- June 7, 2014 (in print).
- 4) 梅館拓也, Barry A. Trimmer, 「連続性・大変形性を活用したイモムシ型ソフトロボットの自律分散制御」, 第26回自律分散システムシンポジウム予稿集, 2A2-3, 2014年1月23日-24日
- 5) 風間俊哉, 梅館拓也, 石黒章夫, 小林 亮, 「大変形シート構造物遊泳推進における身体・流体間相互作用機構理解に向けたソフトロボティクスアプローチ」第31回日本ロボット学会学術講演会, 3K3-03, Tokyo, Japan, Sep. 6, 2013.