

「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」  
平成20年度採択研究代表者

H23 年度 実績報告
----------------

小林 亮

広島大学大学院理学研究科・教授

生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開

## §1. 研究実施体制

### (1) 小林グループ

① 研究代表者: 小林 亮 (広島大学大学院理学研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・ 自律分散制御の設計論の構築
- ・ ヒラムシの運動の解析
- ・ 1次元這行運動の力学的モデリングとシミュレーション
- ・ 粘菌振動子の理論解析
- ・ 4足歩行の歩容遷移のモデリング
- ・ 這行における粘液の効果の理論的考察

### (2) 中垣グループ

① 主たる共同研究: 中垣俊之 (公立はこだて未来大学システム情報科学科部、教授)

#### ② 研究項目

- ・ アメーバに学ぶ這行力学の一般化モデルとその実験的検証
- ・ アメーバの運動の床張力の測定と解析
- ・ 原形質類似溶液のレオロジー特性の計測
- ・ アメーバ運動に伴う原形質輸送の流体力学
- ・ 粘菌の進行方向選択の数理モデリングと摂動による選択促進の発見

### (3) 石黒グループ

① 主たる共同研究者: 石黒章夫 (東北大学電気通信研究所、教授)

#### ② 研究項目

- 真正粘菌変形体が示す自発的なアトラクタ遷移の発現機序解明とロボットへの実装
- 振動性と興奮性間の自発的スイッチングに基づく新しい CPG モデルの構築と 4 脚ロボット OSCILLEX 1 を用いた自己組織的脚間協調の実験的検証
- 4 脚步容遷移(ウォーク, トロット, ペース, ギャロップなど)の発現機序解明と 4 脚ロボット OSCILLEX 2 を用いた実験的検証
- 非構造環境下で這行可能なヘビのロコモーションに内在する自律分散制御則の理論的考察
- 柔軟な足部から生み出される表在感覚情報に基づく二脚步行の CPG 制御と 2 脚ロボット実機を用いた実験的検証
- ミミズの這行に内在する自律分散制御則の数理的解明
- ヒラムシに着想を得た 2 次元シート型ロボットの自律分散制御則の理論的考察

## §2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

本研究の最終的なねらいは、生物に学ぶことにより、生物並みにしなやかにロバストに、複雑で不確定な現実の環境の中を動き回れるロボットを作ることである。そのために生物学者・数学者・工学者からなるチームを編成した。目標達成のためにはロボットに大自由度を与え、かつそれをうまく制御しなければならない。これを達成するためにキーとなるのは、自律分散制御と自己組織化によるロコモーション生成である。しかし、現状では自律分散制御には自律個と全体を結ぶ「設計原理」が欠落している。我々は、粘菌やアメーバのように自律分散制御がもっとも端的な形で現れている単細胞生物に立ち返って、この設計原理を抽出することを試みる。これらの生物を起点に、より複雑な多細胞生物のロコモーションにアタックしていくのが、我々のプロジェクトの道筋である。

我々は、粘菌の運動の数理モデルから「齟齬関数」という概念を抽出し、それをを用いた自律分散制御方策を提案した。そして、この制御方策をアメーバ様ロボット<sup>[9,11]</sup>・ヘビ型ロボット<sup>[7,10]</sup>・クモヒトデ型ロボット<sup>[8]</sup>・4脚歩行ロボットなどに適用し、その有効性を示してきた。これらの研究をもとに、初歩的な段階ではあるが、自律分散制御の設計スキームを提案した<sup>[12]</sup>。また、アメーバ運動の計測システムを構築し、様々な力学的計測を行った。さらに、粘菌が高度なネットワーク形成能力を持つことを示し、そのしくみを数理モデルによって解明した<sup>[5]</sup>。このような流れの中で、平成23年度は以下のような研究を行った。

### \* 這行力学の一般化モデルとその実験的検証

1次元この這行のモデルが反応拡散方程式に帰着されることを示し、摂動法を用いた理論解析とシミュレーションを行い、力学的機構を明らかにした<sup>[1]</sup>。それに基づき、種々の生物(貝類、多脚類)において伸縮波と接地摩擦タイミングの関係を計測中である。

### \* アメーバ運動に伴う原形質輸送の流体力学

Shear thinning特性をもつゾルゲル2相流体モデルを作り、流路の自発形成機構を提案した<sup>[2]</sup>。また、アメーバ運動時、蠕動波動がどのように原形質輸送を駆動するかを、粘性流体の力学モデルを構成することにより示した<sup>[3]</sup>。

### 粘菌の進行方向選択の数理モデリングと摂動による選択促進の発見

粘菌忌避物質に出会った時の行動選択のメカニズムの細胞力学モデル化をおこなった。その解析により、力学系におけるサドル構造が行動選択をもたらしているという結論が導かれた<sup>[4]</sup>。

### \* 腹足類の這行の理論解析

腹足類の中でも、アワビ・サザエのように幅のある足を持つものは、単純な1次元歩行をうまく組み合わせ、より効率的な這行を実現していることを、観察と理論から示した。

### \* 真正粘菌変形体が示す自発的なアトラクタ遷移の発現機序解明とロボットへの実装

原形質量保存則を考慮した結合振動子系と齟齬関数に基づく局所的なセンサフィードバックから、粘菌に見られるような自発的なアトラクタ遷移が生み出されることを示した。また、粘菌振動子ロボットによる実機検証を行った。この力学系の構造の解明は、次年度以降も引き続き行う。

### \* 非構造環境下でのヘビのロコモーションに内在する自律分散制御則の理論的考察

深部体性感覚情報に基づく曲率微分制御と、体壁の表在感覚情報に基づいた反射メカニズムの組み合わせで、とっかかりを利用したロコモーションが効果的に実現されることを理論的に示した(図1)(投稿中)。次年度は、本モデルの妥当性を検証するために、50体節程度から構成されるヘビ型ロボット実機 HAUBOT 3 を構築する。

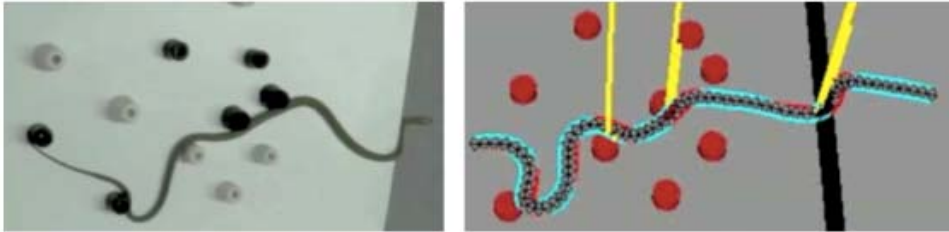


図1: 実際のヘビの動きと提案する自律分散制御則を実装したヘビロボットの動きの比較. 著しい一致が見られる。

### \* 共振をベースにした4足歩行の歩容遷移モデル

数理モデルによって、身体の共振特性が中高速領域の歩容(トロット・ペース・ギャロップ)の発現に本質的であることを示し、さらにウォークとトロットのヒステリシス現象の再現に成功した。

### \* 4脚ロボット OSCILLEX 1 & 2

OSCILLEX 1 は振動性と興奮性の自発的スイッチングによって、極めて素早く静止状態から定常歩行に移行することができるロボットである(図2左)。また、身体特性によりウマ的ウォークと霊長類的ウォークが排他的に創発すること(図2右)を示した。また後継の OSCILLEX 2 では、ウォークから中高速領域の歩容遷移を実現させることで、上記の共振の役割の実機検証を目指す。

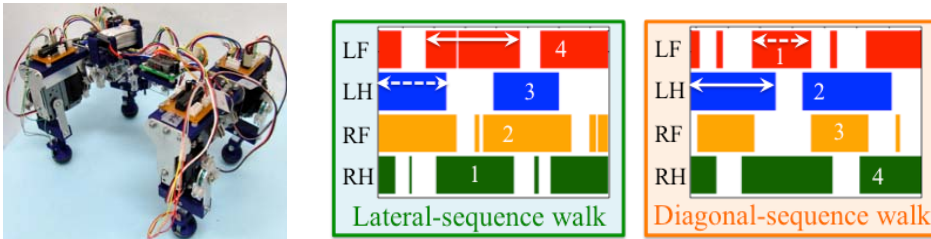


図2: OSCILLEX 1(左)と、それを用いた実測データ(右)。

### \* その他の研究

ヒラムシの運動解析、およびヒラムシ型ロボット(Sheetbot)の理論的考察。腹足類の這行における

粘液の効果に関する数理的アプローチ。ミミズの這行の自律分散制御則に関する理論的解析。柔軟な足部の表在感覚を利用した2脚歩行の CPG 制御と、その実機検証。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

1. Y. Tanaka, K. Ito, T. Nakagaki, and R. Kobayashi : “Mechanics of limbless crawling driven by contraction waves and friction control”, *The Royal Soc. Interface*, vol.9, no.67, 222-233 (2012). ( doi:10.1098/rsif.2011.0339)
2. R. D. Guy, T. Nakagaki and G. B. Wright : “Flow-induced channel formation in the cytoplasm of motile cells”, *Physical Review E*, 84, 016310 (2011). (DOI:10.1103/PhysRevE.84.016310)
3. M. Iima and T. Nakagaki : “Transport and mixing of chemicals inside the body of a micro-organism”, *Journal of Mathematical Medicine and Biology*, accepted (2011) (doi: 10.1093/imammb/dqr010)
4. Kei-ichi Ueda, Seiji Takagi, Yasumasa Nishiura, and Toshiyuki Nakagaki : “Mathematical model for contemplative amoeboid locomotion”, *Physical Review E*, 83, 021916 (2011). (DOI 10.1103/PhysRevE.83.021916)
5. Shin Watanabe, Atsushi Tero, Atsuko Takamatsu, Toshiyuki Nakagaki: "Traffic optimization in railroad networks using an algorithm mimicking an amoeba-like organism, *{Xit Physarum} plasmodium* ", *Biosystems*, Vol. 105, 225-232 (2011)
6. Tanya Latty, Kai Pamsch, Kentaro Ito, Toshiyuki Nakagaki, David J. Sumpter, Martin Middendorf, Madeleine Beekman: “Structure and formation of ant transportation networks”, *Journal of The Royal Society, Interface*, (2011). (DOI: 10.1098/rsif.2010.0612)
7. Takahide Sato, Takeshi Kano, and Akio Ishiguro, “On the applicability of the decentralized control mechanism extracted from the true slime mold: a robotic case study with a serpentine robot”, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.6 (2011) (DOI: 10.1088/1748-3182/6/2/026006)
8. Wataru Watanabe, Takeshi Kano, Shota Suzuki, and Akio Ishiguro, “A decentralized control scheme for orchestrating versatile arm movements in Ophiuroid omnidirectional locomotion”, *Journal of Royal Society of Interface*, vol.9, no.6, 2011 (DOI: 10.1098/rsif.2011.0317)
9. Takuya Umedachi, Koichi Takeda, Toshiyuki Nakagaki, Ryo Kobayashi, and

Akio Ishiguro, “A Soft Deformable Amoeboid Robot Inspired by Plasmodium of True Slime Mold”, *International Journal of Unconventional Computing*, vol.7, no.6, pp.449-462, 2011

10. \*Takahide Sato, Takeshi Kano, and Akio Ishiguro, “A decentralized control scheme for an effective coordination of phasic and tonic control in a snake-like robot”, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.7, no.1, 2012 (DOI: 10.1088/1748-3182/7/1/016005)
11. Takuya Umedachi, Ryo Idei, Toshiyuki Nakagaki, Ryo Kobayashi, and Akio Ishiguro, “Fluid-filled Soft-bodied Amoeboid Robot Inspired by Plasmodium of True Slime Mold”, *Advanced Robotics*, vol.26, pp.693-707, 2012 (DOI: 10.1163/156855312X626316)
12. R. Kobayashi, T. Nakagaki and A. Ishiguro : “Novel Control Principle Based on the Discrepancy Function”, *RIMS Kokyuroku Bessatsu* (accepted)