

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

- ・粘菌に想を得た保存則付き結合振動子の力学系解析とロボットへの応用
- ・ヒラムシの多様な運動の観測と数理モデル構築、及びロボット製作
- ・ヘビ型ロボットの操縦シミュレータの開発
- ・這行運動における粘液の力学的役割の理論的解明
- ・進化的観点からの運動と制御様式の継承を考える

### (2) 中垣グループ

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

② 研究項目

- ・アメーバ運動の細胞内三次元流れ場と重心移動
- ・原形質、無細胞系細胞質、アクチン溶液のレオロジー測定と仮足形成
- ・多脚類、貧毛類、腹足類などの這行における蠕動波動と重心移動の関係
- ・粘菌の知的ロコモーション能を用いた交通網と都市の共進化
- ・細胞行動のバラエティ創発のしくみ

### (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奇な CPG モデルの構築と 4 脚ロボットを用いた歩容遷移の実験的検証 (ペース・トロットの排他的発現等)
- ・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構築と検

#### 証用ロボット実機の開発

- ヒラムシに着想を得たマルチテレストリアルロコモーションの発現機序解明と検証用ロボット実機の開発
- 6脚歩行の脚間協調機序の解明と検証用 6脚ロボット実機の開発

## § 2. 研究実施内容

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。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。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り、「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<sup>[1]</sup>。そして、この制御方策をアメーバ様ロボット・ヘビ型ロボット・クモヒトデ型ロボット・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。また、アメーバ運動の計測システムを構築して様々な力学的計測を行ない、レオロジー的性質からアメーバ運動のメカニズムを調べた。このような流れの中で、平成 24 年度は以下のような研究を行った。

### 原形質、無細胞系細胞質、アクチン溶液のレオロジー測定と仮足形成

アメーバ運動の基本となる原形質のレオロジー特性を解明するために、原形質類似溶液(アクチン溶液)の性質を調べた。空間一様に印可された「ずり」に対して流動速度場が自発的に二層に分離するというシアバンド現象を発見し<sup>[3]</sup>、粘性突起現象の観点から仮足形成過程の考察を行った。

### 多脚類、貧毛類、腹足類などの這行における蠕動波動と重心移動の関係

昨年度、這行運動の制御方式が生物種の違いを超えて広く共通することを理論的に示唆した。この検証のため、腹足類・貧毛類・多毛類・多脚類・昆虫類の這行運動モードを様々な人工環境下で観察し、新しく発見した運動モードを含めて、我々の理論で解釈可能であることを示した。

### 細胞行動のバリエティ創発のしくみ

粘菌の不快情報(毒物)に対する多様な適応行動を、力学モデルによった再現した<sup>[4]</sup>。単純化モデル方程式の理論解析により、粘菌行動の多様性発現の力学的仕組みを捉えることに成功した。

### ヒラムシの運動の計測とモデル化及びロボット製作

ヒラムシの持つ多様な運動形態の中で、這行と遊泳の運動解析を行った。これに基づいて、2次元的な這行の数理モデルを構築し、遊泳パターンを再現するソフトロボットを製作した。

### 腹足類等の這行運動における粘液の力学的役割の解明

粘液のレオロジーがある種のヒステリシスを持つという実験事実に基づき、Direct wave 型と Retrograde wave 型の両這行様式が自然に実現可能であることを、数理モデルによって示した。

### 振動性・興奮性間の自発的スイッチングに基づく新奇な CPG モデルの構築と、4脚ロボットを用いた歩容遷移の実験的検証

脚荷重に基づく興奮性／振動性の自発的スイッチングを内包した CPG 制御則をロボットに実装

し, 1) 静止状態から歩行状態への瞬時遷移, 初期値非依存性, 2) 身体の力学的特性に依存して lateral sequence walk や diagonal sequence walk を排他的に創発, 3) 一脚だけに荷重をかけてもデューティ比が自己組織的に変化して適応可能 といったこれまでの CPG モデルとは一線を画する能力を実現した<sup>[9]</sup>. 図 1 に示す四脚ロボットを用いて, 身体パラメータに依存したトロットとペースの排他的発現が起こることを示した. 次年度は, ギャロップに至る歩容遷移実現を目指す.

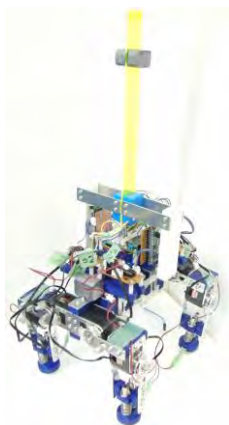


図 1: トロットとペースの排他的発現の機序理解のために構築した 4 脚ロボット.

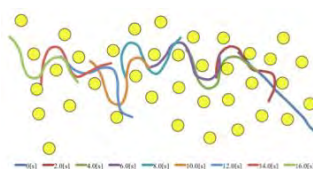


図 2: HAUBOT3(上), 非構造環境下での実機実験の結果(下)

### 非構造環境でのヘビ運動に内在する自律分散制御則の構築と検証用ロボットの開発

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実現されることを理論的に示し<sup>[6]</sup>, ヘビ型ロボット実機 HAUBOT3 によってこの理論の妥当性を検証した. (図2)

### 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

昨年度, 真正粘菌をモチーフとした保存則付き結合振動子系と齟齬関数に基づく制御により, 自発的なアトラクタ遷移が生み出されることを示した<sup>[11]</sup>. これに基づき, 「走性」と「徘徊」という質的に異なる振る舞いを状況依存的に発現するロボット実機(図 3)を構築した<sup>[10]</sup>.

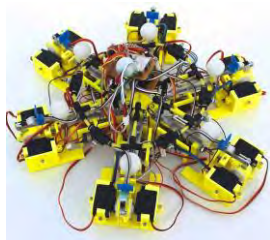


図 3: 粘菌的ロボット

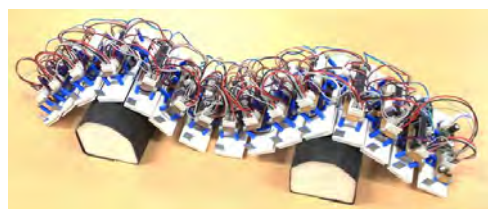


図 4: マルチテレストリアルロボット

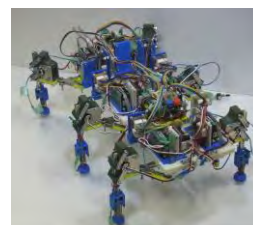


図 5: 6 脚ロボット

### その他の研究

アメーバ運動の細胞内三次元流れ場と重心移動, 粘菌変形体による都市と交通網の共進化再

現実験、ヒラムシの海底這行に想を得たマルチテレストリアルロボット(図 4)の開発<sup>[7]</sup>、脚荷重に基づく振動性/興奮性スイッチングによる自律分散制御則の6脚歩行への拡張(図 5)、視界共有を用いた直感的ヘビ型ロボット操縦シミュレータの開発、クモヒトデ型ロボットの開発<sup>[5,9]</sup> など。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ●論文詳細情報

1. Ryo Kobayashi, Toshiyuki Nakagaki, Akio Ishiguro : “Novel Control Principle Based on the Discrepancy Function”, RIMS Kokyuroku Bessatsu , B31 : 61-77 (2012)
2. Qi Ma, Anders Johansson, Atsushi Tero, Toshiyuki Nakagaki, David J. T. Sumpter: "Current reinforced random walks for constructing transport network", The Royal Soc. Interface, Vol. 10, 20120864 (2013). (doi:10.1098/rsif.2012.0864)
3. Itsuki Kunita, Katsuhiko Sato, Yoshimi Tanaka, Yoshinori Takikawa, Hiroshi Orihara, and Toshiyuki Nakagaki: "Shear Banding in An F-actin Solution", Physical Review Letters, Vol. 109, 248303 (2012). (DOI:10.1103/PhysRevLett.109.248303).
4. Kei-ichi Ueda, Seiji Takagi, and Toshiyuki Nakagaki : "Tactic direction determined by the interaction between oscillatory chemical waves and rheological deformation in an amoeba", Physical Review E 86, 011927 (2012). (doi: 10.1103/PhysRevE.86.011927)
5. Takeshi Kano, Shota Suzuki, Wataru Watanabe, and Akio Ishiguro,“Ophiuroid robot that self-organizes periodic and non-periodic arm movements”, Bioinspiration & Biomimetics, 7 (2012) (DOI:10.1088/1748-3182/7/3/034001)
6. Takeshi Kano, Takahide Sato, Ryo Kobayashi, and Akio Ishiguro, “Local Reflexive Mechanisms Essential for Snakes’ Scaffold-based Locomotion”, Bioinspiration & Biomimetics, 7 (2012) (DOI:10.1088/1748-3182/7/4/046008)
7. Takeshi Kano, Yuki Watanabe, and Akio Ishiguro, “Towards Realization of Multi-terrestrial Locomotion: Decentralized Control of Sheet-like Robot Based on Scaffold-exploitation Mechanism”, Bioinspiration & Biomimetics, 7 (2012) (DOI:10.1088/1748-3182/7/4/046012)
8. Dai Owaki, Takeshi Kano, Ko Nagasawa, Atsushi Tero, and Akio Ishiguro, “Simple Robot Suggests Physical Interlimb Communication Is Essential for Quadruped Walking”, Journal of The Royal Society Interface (2012) (DOI:10.1098/rsif.2012.0669)
9. 渡邊 航, 鈴木翔太, 加納剛史, 石黒章夫, 腕運動の自己組織的役割分担生成を可能とする

クモヒトデ型ロボットの自律分散制御, 計測自動制御学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.48-53 (2013)

10. Takuya Umedachi, Ryo Idei, Kentaro Ito, and Akio Ishiguro, "A Fluid-filled Soft Robot That Exhibits Spontaneous Switching among Versatile Spatio-temporal Oscillatory Patterns Inspired by True Slime Mold", *Artificial Life*, 19-1,
11. Takuya Umedachi, Ryo Idei, Kentaro Ito, and Akio Ishiguro, "True-slime-mould-inspired hydrostatically-coupled oscillator system exhibiting versatile behaviours", *Bioinspiration & Biomimetics* (2013)(in press)
12. Itsuki Kunita, Sho Sato, Tetsu Saigusa and Toshiyuki Nakagaki: "Ethological response to periodic stimulation in *Chara* and *Brepharisma*", *Natural Computing, Proceedings in Information and Communications Technology (PICT)*, Springer-Verlag, (to appear).
13. Itsuki Kunita, Kazunori Yoshihara, Atsushi Tero, Kentaro Ito, Chiu Fan Lee, Mark D. Fricker and Toshiyuki Nakagaki: "Adaptive path-finding and transport network formation by the amoeba-like organism *Physarum*", *Natural Computing, Proceedings in Information and Communications Technology (PICT)*, Springer-Verlag, (to appear).