

小林 亮

広島大学大学院理学研究科  
教授

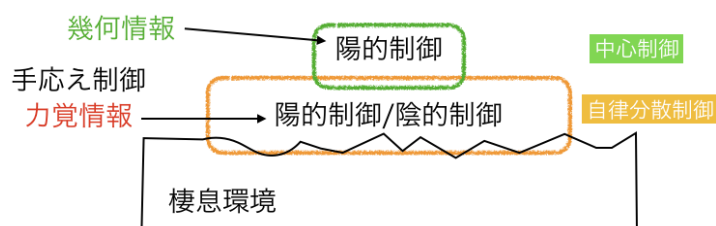
## 環境を友とする制御法の創成

### §1. 研究成果の概要

「本質的に予測不可能に変化する環境の中を生き物のようにしなやかに動き回ることができる、実時間環境適応能力をもった人工物はどうすれば造れるのか？」本プロジェクトは、このまだ解かれていない問題への挑戦である。進化の結果として動物たちは、高等下等を問わず、その能力を持っている。そこで我々は動物たちに学ぶことにより、制御の視座から次の 3 つの基本コンセプトを提案した。

- (1) 手応え制御: 環境との相互作用をリアルタイムに評価しながら、利用できるものは積極的に利用する。
- (2) 陰陽制御: 陽的制御 (明示的な制御則) と陰的制御 (身体と環境のダイナミクスから表出する制御則) の適切な結合により、環境適応的な制御を実現する。
- (3) 階層制御: 自律分散制御と中枢制御が適切に組み合わせられていて、大自由度を持つ身体を無理なくリアルタイムで制御できる。

我々はこれらを統合した制御方策を「環境を友とする制御法」と名付け、その創成を通して動物のように複雑な環境の中をしなやかに動き回ることのできるロボットを創ることを目指している。



環境を友とする制御法概念図

4足動物・多足類・昆虫など脚歩行を行う動物の運動においては、脚同士の協調関係が重要であり、本プロジェクトでは様々な状況での歩容を適切に実現する制御則を研究してきた。特に多足類はその繰り返し体節構造からもわかるように、自律分散制御があらわに実現しており、数億年に渡って生き延びてきたという事実と合わせて、本プロジェクトの柱である手応え制御・陰陽制御・階層制御を研究するための、非常に優れたモデル生物である。本年度は、多足類における典型的な歩容が、2通りの脚同士の交差禁止則によって実現されることを明らかにし、多足類全体の運動に関する統一的な見地を得ることができた。これらの知見は現在開発中のムカデ型ロボットの設計に反映されている。また、4足動物・ムカデ・フナムシなどの動物に関し、従来研究されてきた脚間協調だけではなく、胴体の持つ自由度を融合することで、より高度な運動が実現されていることを数理モデルによる研究で明らかにした。また、工学的なシステムと違い、動物は環境について完全な情報は得られないが、そのような条件下でもタスク(餌の捕食、障害物回避など)を無事にこなしている。コウモリのエコーロケーション、ムカデの触角による障害物認知などを題材として、不完全情報下における行動決定に関する研究を行なった。

#### 【代表的な原著論文】

1. Takeshi Kano, Yoshihito Ikeshita, Akira Fukuhara, Akio Ishiguro, Body-limb coordination mechanism underlying speed-dependent gait transitions in sea roaches, *Scientific Reports*, vol. 9, 2848, 2019
2. Y. Yamada, K. Ito, T. Tsuji, K. Otani, R. Kobayashi, Y. Watanabe and S. Hiryu: "Ultrasound navigation based on minimally designed vehicle inspired by the bio-sonar strategy of bats", *Advanced Robotics*, 33(3-4): 169–182 (2019)
3. A. Fukuhara, D. Owaki, T. Kano, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, "Spontaneous gait transition to high-speed galloping by reconciliation between body support and propulsion", *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 15, pp. 794-808, 2018

## §2. 研究実施体制

### (1) 小林グループ

- ① 研究代表者: 小林 亮 (広島大学理学研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・ コウモリのエコーロケーション、および飛行経路決定の数理的研究
  - ・ ムカデの3次元モデルの構築と、不規則面上での歩容の再現
  - ・ 不完全情報下におけるタスク達成のための行動決定方策
  - ・ 触角による空間認知と行動決定

## (2) 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

- ・ 手応え制御の数理構造に関する考察
- ・ 胴体と脚という異質の身体自由度間の協調(body-limb coordination mechanism)を実現する制御原理の考察
- ・ **Body-limb coordination mechanism** を活用した高速脚式ロコモーションの実現
- ・ 手応え関数と齟齬関数の融合に関する考察
- ・ ムカデなどの超多脚歩行に内在する脚間協調メカニズムの数理モデル構築, ならびに検証用のロボットプラットフォームの設計・製作
- ・ 6脚ロコモーションの脚内協調メカニズムの再考
- ・ 絶滅動物のロコモーションの再現方法の構築に関する考察

## (3) 青沼グループ

① 主たる共同研究者:青沼 仁志 (北海道大学電子科学研究所 准教授)

### ② 研究項目

- ・ X線マイクロCTを用いた節足動物の筋骨格系の無破壊イメージングによる詳細な構造解析と考察
- ・ X線マイクロCTを使った昆虫の運動中における筋骨格系のライブイメージングによる動作計測と考察
- ・ X線回折法による, 昆虫の高速運動時の筋の弛緩, 緊張などの状態の計測と考察.
- ・ 昆虫の外骨格の弾性変形を使った運動の制御機構の解析と考察
- ・ 昆虫のチープな身体構造から適応的な運動が生まれるカラクリについての考察
- ・ 昆虫や多足類および棘皮動物などの適応的なロコモーション生成の基盤となる神経生理機構についての実験と考察
- ・ 経験や学習に基づいて状況に応じた行動を発現する神経生理機構についての実験と考察

## (4)「大須賀」グループ

① 主たる共同研究者:大須賀 公一 (大阪大学大学院工学研究科 教授)

### ② 研究項目

- ・ アクチュエータに内在する力学特性が引き起こす, 多様な運動パターンの発現
- ・ **i-CentiPot** の商品化
- ・ 陰的制御構造を同定するための閉ループ同定に関する考察
- ・ ヘビとスナヘビは何が違うか:環境に応じた蛇行ロコモーションの考察
- ・ 物理パラメータ変化による環境に適応した運動の発現