戦略的創造研究推進事業　CREST
研究領域「現代の数理科学と連携する
モデリング手法の構築」
研究課題「環境を友とする制御法の創成」

研究終了報告書

研究期間　2014年10月～2020年3月

研究代表者：小林　亮
（広島大学大学院統合生命科学研究科、教授）

§1 研究実施の概要

(1)実施概要

Questions

1. どうして、自然環境の中や私たちの日常の生活空間を普通に動き回れることができるロボットがいないのか？
2. どうして動物たちにはそれができるのか？

本プロジェクトは、上の素朴な疑問に答え、動物のように本質的に予測不能な環境の中を動き回ることのできる移動ロボットの設計原理の構築を目指した。 まず我々は、徹底した環境の既知化に基づく現在のロボットの制御法に根本的な問題があると考えた。そこで本プロジェクトでは、従来の工学の王道ではなく、動物に学ぶ道を選び、次の 3 つのキーコンセプトを提唱した。

(1) 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。
(2) 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。
(3) 陰陽制御：陽的制御（書かれた制御則）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。

動物が見せるしなやかかつタフな動きは、身体の持つ力学的な大自由度を適切にコントロールしていることによっている。何が起こるか前もってわからない状況下で適応的に大自由度をコントロールするためには自律分散制御が本質的に不可欠である。と同時に、環境の中をいかに動くかといった高次の判断は中枢で制御する必要がある。我々は様々なモデル生物の実験・観察から、自律分散制御と中枢制御、それらのコンビネーションのありようを調べた。特に注目したのが、ムカデである。ムカデは 4 億年もその姿をほとんど変えておらず、かなり早い段階で完成形に達した生物であると考えられる。ムカデの運動と制御の数理モデル化を通して、自律分散制御のあり方、および自律分散制御と中枢制御の融合の仕方を明らかにしてきた。また、脳を持たないクモヒトデの環境適応能力・故障適応能力を支える自律分散的な制御構造を明らかにした。また、コウモリのエコーロケーションによる飛行経路選択など通して、不完全情報下での行動決定という中枢制御の役割の研究を行った。これらの成果はロボットに実装され、その効力が実証された。

自律分散制御の具体的な設計に関しては、力覚を情報源とする手応え制御の枠組みを構築した。手応え制御とは、まず動いてみてその結果生じた環境との相互作用が意図する運動に対して望ましいか否かを判断し、運動を強化するかどうかを決めるという制御法である。これは、前もって全ての環境情報を知った上で制御方策を決めるという従来の制御のスキームとは本質的に異なるものである。我々のように、前もって全ての環境情報を知ることは現実にはできないという前提に立つ以上、自然に出てくる概念であるが、TEGOTAE という新しい名称で世界に発信し、それが広がりつつある。数理的には、運動の結果生じた力覚と運動意図の親和度を定量化する手応え関数の勾配を用いて、制御信号を生成する。この手応え制御の有効性を Oscillex, PENTABOT などのロボットを構築することで証明した。

上記の手応え制御は、陽的な制御であるが、それとともに重要な概念が陰的制御である。陰的制御とは環境と身体の力学的相互作用のうち、制御目的に資するものをいう。これは従来の意味での制御（陽的制御）とは異なる概念であるため説明が難しいが、さまざまな動物の身体構造を調べることにより、実は陰的制御こそ動物が不確定な環境下を動き回る上で最も重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。よい陰的制御はそれとペアになる陽的制御の状態空間の次元を劇的に下げ、神経系（陽的制御系）の負荷を軽くする。長い進化の果てに動物たちは生息環境で起きるさまざまな状況に対応できる陰陽制御を獲得してきているのである。特に陰的制御の重要性と効力を端的に示すロボット i-CentiPot を開発し世に問うことができた。また理論面では、「弱い」ア

クチュエータが適切な身体と組み合わされることで、多様な運動パターンが生成されることが示された。 また、モデル生物の身体構造を調べるための基盤技術として、X 線マイクロ CT による複雑な 3 次元構造の解析法を開発した。

このプロジェクトを通して，我々が提唱した 3 つのコンセプトは正しい指針だったという確信を深めることができた。しかし我々の目指す、真に動物のごとく不確定な環境の中を動き回ることのできるロボットの実現には、まだ道半ばである。この後も、目標の実現に向けた研究を進めていきたいと考えている。

(2)顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1．T. Kano, E. Sato, T. Ono, H. Aonuma, Y. Matsuzaka, and A. Ishiguro, "A Brittle Star-like Robot Capable of Immediately Adapting to Unexpected Physical Damage", Royal Society Open Science, vol. 4, 171200, 2017

概要：きわめて単純な分散神経系しか有さないにもかかわらず身体の一部の欠損に即座に適応して推進するクモヒトデのロコモーションに着想を得て，想定外の故障に即座に適応可能な手応え制御ベースの自律分散制御則を構築した．開発したクモヒトデ型ロボット実機を用いて提案制御則の妥当性を検証し，実際のクモヒトデと同等の振る舞いを再現することに成功した．想定外の故障に即座に適応可能なロボットを構築したのは世界初であり，その学術的および社会的インパクトはきわめて大きい．

2．D. Owaki and A. Ishiguro, "A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions From Walking to Trotting to Galloping", Scientific Reports 7:277, doi:10.1038/s41598-017-00348-9 (2017)

概要：手応え制御に基づく自律分散制御則の妥当性を四脚ロボット実機に実装して実験的に検証した．極めてシンプルな制御則によって，四脚動物が示す速度に応じた歩容遷移現象を世界で初めてロボットで再現することに成功した。また，1 歩目からの定常歩行，身体のウェートバランスによる歩容の変化，優れたエネルギー効率などを実現した。

3．i-CentiPot

概要：ムカデ型多脚ロボット i-CentiPot を開発した．本ロボットは，3 自由度関節で連結された 16 リンクの胴体と 32 本の脚を有しており，無限定環境（屋外環境）下において実時間適応的に移動可能なロボットの実現例として試作された．このロボットは，屋外の林の中などで路面に凹凸や岩などがあったり，落ち葉などが多数散乱していたりしても，自身が移動可能な方向を探り，路面の形状に倣うことで，無理をせずに進む．完全な陰的制御のみで，このような環境適応性を実現できることを明示したことに加え， i-CentiPot の動きを見たときの多くの人の第一声が「気色悪！」であったことが重要である．それはこのロボットが，生き物らしい動きを体現できていたからに他ならない。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞

1．小惑星探査ローバー MINERVA-II2

概要： 2019 年 10 月現在，小惑星「りゅうぐう」に滞在している「はやぶさ2」には大須賀が開発に加わった小惑星探査ローバー「MINERVA-II2」が搭載されている．このような小惑星の表面は全く未知なので，そこで移動可能なローバーを設計することは，まさに本プロジェクトで提唱している「開いた設計スキーム」を実践しなくてはならない．大須賀らはこの特性を逆手にとって

「陰的制御」を主役にして環境の未知性を活かして移動し続ける制御系を構成した. この「MINERVA-II2」は 2019 年 10 月 8 日現在, リュウグウに降下中である.

2. Micro-CT を用いた複雑な 3 次元構造の解析法の開発
概要:X 線マイクロ CT で撮影した画像から, 3 次元構造を再構築するために, 明度・テクスチャ・距離の 3 つの特徴に基づいた尤度を設計し, 3次元構造を最尤推定する新規な方法論を提案した. 具体的には, 明度尤度・テクスチャ尤度は, 学習データからヒストグラムを作成し, 正規分布で近似することにより得て, 距離尤度は, 領域成長の核となるSeed 点からの距離に基づいた分布を新たに設計した.

＜代表的な論文＞
・T. Kano, E. Sato, T. Ono, H. Aonuma, Y. Matsuzaka, and A. Ishiguro, "A Brittle Star-like Robot Capable of Immediately Adapting to Physical Damage", Royal Society Open Science, Vol.4, No.2, DOI: 10.1098/rsos.171200 (2017)
・D. Owaki and A. Ishiguro, "A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions From Walking to Trotting to Galloping", Scientific Reports 7:277, doi:10.1038/s41598-017-00348-9 (2017)
・D. Wakita, Y. Hayase and H. Aonuma, "Different Synchrony in Rhythmic Movement Caused by Morphological Difference between Five- and Six-armed Brittle Stars", Scientific Report 9, 8298 (2019)

§2 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

小林グループ:
① 研究代表者:小林 亮(広島大学大学院統合生命科学研究科 教授)
② 研究項目
・ 動物やロボットの運動と制御の数理モデリング
・ 手応え制御・陰陽制御の数理の抽出
・ 環境を友とする制御理論の構築

石黒グループ:
① 研究代表者:石黒章夫(東北大学電気通信研究所 教授)
② 研究項目
・ 手応え制御の数理の抽出とロボットによる実現
・ モデル動物の構造・運動・生理データの収集
・ 古生物学への展開

青沼グループ:
① 研究代表者:青沼仁志(北海道大学電子科学研究所 准教授)
② 研究項目
・ マイクロ CT による動物の 3 次元構造計測技術の開発
・ モデル動物の構造・運動・生理データの収集
・ 手応え制御・陰陽制御の数理の抽出

大須賀グループ：
① 研究代表者：大須賀公一（大阪大学大学院工学研究科　教授）
② 研究項目
・ 陰陽制御の数理の抽出とロボットによる実現
・ 災害現場探査ロボット・惑星探査ロボットの開発
・ 環境を友とする制御理論の構築

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について
タフツ大学：昆虫の歩脚の筋骨格系の構造と運動、ソフトロボット
同志社大学：コウモリのエコーロケーション
パリ第7大学：運動量流による動物やロボットの力学的解析
スイス連邦工科大学ローザンヌ校：水陸両用ロコモーションに内在する制御原理の理解
オタワ大学：　ムカデが示す水陸両用ロコモーションの発現機序解明
マンチェスター大学：　絶滅動物のロコモーション復元
ワーリック大学：　生物が示すタフさの発現機序解明と工学応用
サウザンプトン大学　：　バッタのロコモーション
ロンドン大学クィーンメリー校：　棘皮動物の運動制御に関わる神経ペプチドの役割
アリゾナ大学:　セアカゴケグモの攻撃行動に関わる神経修飾物質の働き
ライプツィッヒ大学　：　コオロギの攻撃性の発現機序
早稲田大学:　軟体動物リムネアの学習行動に関わる生体アミン類の役割
ロシア科学アカデミー: 軟体動物リムネアのロコモーションに関わるセロトニンの働き
コマツ：次世代建機の開発に向けた柔軟建機の概念設計
タミヤ：i-CentiPotの模型開発と販売によるCREST研究の啓発
岡山理科大学：柔軟クローラの建機への展開