

「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

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. 研究実施の概要

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は、CPG (Central Pattern Generator) を核とした自律分散制御と自己組織化によるロコモーション生成が必要であるが、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な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。実際、単細胞生物のロコモーションには、中枢が無い故に自律分散制御がもっとも端的な形で現れているからである。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。

平成21年度は、これまでの研究から得られた概念である齟齬関数(discrepancy function)を用いた自律分散制御を、様々なタイプの運動のシミュレーションや、ロボットの制御に適用し、その有効性の検証を行った。我々の基本的なアイデアを一言でいえば「齟齬を積極的に作り出し、それを手なずける」というものである。

我々の研究の起点であるアメーバ運動に関しては、まだ決着のついていない運動のメカニズムの完全な解明が一つの大きな目標である。そのために画像処理技術と応力分布測定技術を開発し、それを用いて仮足形成の仕組みが部分的ではあるが明らかになってきた。またリズム的な運動を説明するために構成した数理モデルが、後部収縮説への有力な傍証を与えた。ただ、仮足の縮退についてのメカニズムは単純な後部収縮では説明できておらず、今後の研究課題である。また実機に関しては、昨年度に開発したアメーバ様ロボットのシミュレーションを行い、原形質保存による遠距離相互作用とカップルすることで、齟齬関数を用いた自律分散制御が有効に働くことを検証した。ただし現在の実機は、柔軟性と原形質保存が十分でなく、改良する必要がある(試作

中)。これらの研究と平行して、粘菌の知的ロコモーション = スマートなネットワークの形成に関する研究を行った。

CPGとRTS(Realtime Tunable Spring)を直列につなぐことで、紐状生物の這行を数理的に表現するためのプラットフォームを構築した。これを用いて、1次元この這行の分類を行った。またヘビ型の這行において、齟齬関数を用いた制御の有効性が数理モデルによって確認された。さらにヘビ型ロボットを製作し、実機においても同様に齟齬関数による制御の有効性が示された。ただし、実際のヘビの運動は遙かに高度なものであることが、運動計測を通して見えてきており、このプロジェクト中にどこまで本物に迫れるかは、大きなチャレンジであると考えている。

平行して4足歩行の数理モデルの構築を行った。現段階のモデルはかなり抽象的なレベルのものではあるが、歩容遷移の本質を捕らえていると我々は考えており、これをベースに現実に近いモデルや実機製作へと展開していきたい。

§ 2. 研究実施体制

(1) 小林グループ(広島大学)

①研究分担グループ長:小林 亮(広島大学、教授)

②研究項目

1. アメーバ運動の数理モデルの構築
2. 1次元この這行の数理モデルの構築と分類
3. 2次元この這行(ヘビ、線虫など)の数理モデルの構築
4. Discrepancy 関数を用いた制御則の定式化と応用
5. 4足歩行の数理モデルの構築と、歩容遷移の理解

(2) 中垣グループ(北海道大学)

①研究分担グループ長:中垣 俊之(北海道大学、准教授)

②研究項目

1. アメーバの運動解析のための体変形・原形質流動・床反力の測定系の開発。
2. アメーバ運動の仮足形成と重心移動の力学機構の解明。
3. アメーバ運動の単純化力学モデルの考案。
4. アメーバ型ロボットの制御機構につながる生物学的運動制御機構の抽出。
5. アメーバの知的ロコモーション能の性能評価。

(3) 石黒グループ(東北大学)

①研究分担グループ長:石黒 章夫(東北大学、教授)

②研究項目

1. アクチン繊維の伸縮を工学的に模擬した可変弾性要素の開発
2. Discrepancy function に基づく自律分散制御則を実装したアメーバ様ソフトロボットの設計・製作と実験的検証
3. Discrepancy function に基づく自律分散制御則を実装したヘビ型ロボットの設計・製作と実験的検証
4. 身体の力学的特性変化に柔軟に適応可能なマルチリズムオシレータモデルの開発
5. CPG と筋骨格系, そして環境間で強力なグローバルエントレインメントの成立を保証する脳・身体間の連関様式に関する数理的考察(四脚ロボットを用いた事例研究)
6. Phasic な制御と tonic な制御の有機的な連関を可能とする自律分散制御則の数理モデル構築

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

平成21年度はアメーバ運動を中心に、這行、4足歩行の研究を行った。

アメーバ運動

粘菌アメーバとアメーバプロテウスのアメーバロコモーションに伴う細胞変形と原形質流動を、細胞全体にわたり経時測定した。用いた方法は、ビデオ画像処理法であり、独自の計測プログラムを開発して、測定を可能にした。どちらのアメーバでも、尾部の収縮による細胞内圧上昇が、頭部の仮足生成・伸張を促すことがわかった。

しかしながら、仮足形成の駆動力は、細胞内圧上昇だけでなく、仮足基部で局部的に生じる何らかの作用もあることがわかった。この正体は、次年度以降

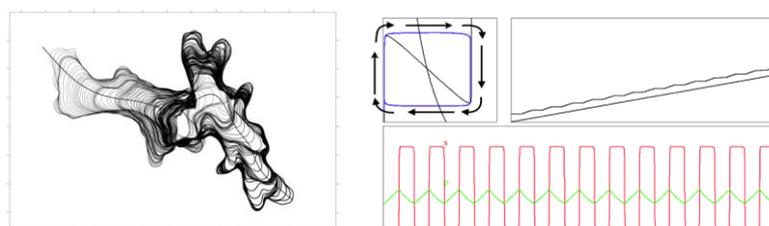


図1. アメーバプロテウスのリズム的な外形変化と、シミュレーション

に追求する。仮足が生成する領域は、細胞外形の凸部であることを発見した。凹部には、細胞内圧に抗することができるほどの細胞骨格が発達している(堅くなっている)ことを突き止めた。

後部収縮による内圧上昇に基づく仮足形成というロコモーション機構を数理モデル化した。現実のアメーバで観察される二つの運動モード、すなわち定速度進行とリズム進行(図1)が、尾部の進行速度をパラメータとして切り替わることがわかった。実験当初においては、この2つの運動モードをコントロール下で選択的に出すことに成功していなかったが、飢餓処理をして活性度を下げればリズム進行が出るということを数理モデルによって予言し、それは実験によって確認された。

アメーバの重心が移動するためには、何らかの外力が必要であるから、その外力をどこから得ているかを測定することが重要である。アメーバ運動をもたらす床反力を時空間的に測定する

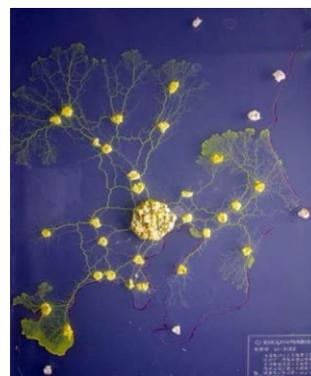


図2.粘菌のつくる多目的なネットワーク

ために、新たな実験法の開発に取り組んだ。蛍光マーカー粒子を分散させた高分子薄膜を調整し、アメーバを這わせる。アメーバ運動による膜の変形から、そこに生じた力を推定する。概ね測定できるようになったので、信頼できるデータを得るために改良している。

複雑環境における粘菌アメーバの知的ロコモーションの一端を解明した。複数の餌場に対する採餌行動を評価したところ、餌場間ルートの最短性(コスト)、ルートの断線に対する迂回可能性(耐故障性)、ルートにそった餌場間距離(効率)の三つの性質が多目的に最適化された(図2)。この機能性をもたらすしくみは、生物学的実験事実に基づく数理モデル[6]により解明された。このアメーバにならって、関東圏の都市間交通ネットワークのデザインを試みて、現実の鉄道ネットワークとの意外な類似性を明らかにした[4]。

アメーバ様ロボットを製作し、齟齬関数による自律分散制御の有効性を検証した[1,3,5]。図3にロボットを狭窄空間に突入させたシミュレーション結果と、齟齬関数の時間発展と位相の時空プロットを示す。両図から、本ロボットは完全な自律分散制御にもかかわらず、原型質量保存則に起因する遠隔相互作用を活用することで、局所的に生起する齟齬の解消を通して自発的な位相調整が行われ、環境依存的な適応的運動機能が創発している様子が見て取れる。現在、原形質保存がより精密に保証された2号機を検討中である。

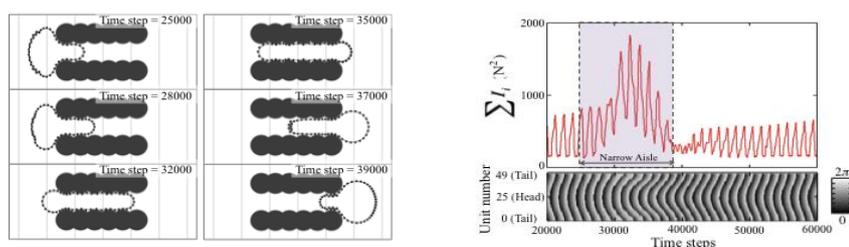


図3.アメーバ様ロボットの狭窄空間突入シミュレーション、および齟齬関数・位相調整のプロット

這行

多細胞生物が地面を這う場合、アメーバのようにゾルゲル変換を用いることはできない。そのため、何らかの形で「ふんばり」と「ずらし」をうまく利用しながら体を移動させており、このような運動様式を這行と呼ぶ。多くの陸生無脊椎動物は紐状の身体を使って、這行による移動を行っている。我々は、CPG と結合された RTS を直列につなぐという描像を用いて、這行の数理モデルを構築した。これを用いて、1次元的な這行の運動様式を、収縮波の伝わり方と接地(ふんばり)のタイミングによって、ミズ型・カタツムリ型・尺取り虫型の3つに分類した。

ヘビの運動も這行であるが、上記の1次元的な這行とは全く異なる運動様式である。我々は実際のヘビの動きを知るために、ジャパンスネークセンター(所長:鳥羽通久氏)に協力を依頼し、ヘビの運動データの収集を行った。ヘビの這行にはいくつかの型があることが知られているが、ヘビは状況に応じてそれらを使い分け、時には混在させ



図4.ヘビの運動の計測実験、およびヘビ型ロボット Haubot 1号

て、極めて高度な運動を行っていることが明らかになってきた。

実験と平行して、lateral undulation の数理モデルを構築し、齟齬関数による Phasic な制御と Tonic な制御を組み合わせた自律分散制御則を用いたシミュレーションを行ない、その有効性を確認した。また、lateral undulation だけでなく、side winding を再現できる数理モデルの構築も行った。

齟齬関数による自律分散制御則の妥当性を検証するために、図 4(右図)に示すようなヘビ型ロボットを製作した。本ロボットは 29 の体節から構成されている。実験の結果、スムーズな蛇行運動の発現のみならず、優れた環境適応能力と耐故障性も併せ持つことが明らかとなった[2]。

ヘビの運動は、身体を持つ大自由度の使いこなし方、また上位からの制御と自律分散制御のバランスを考える上で、非常に示唆に富み、プロジェクトの最終目標の一つに据えるべきという確信を持つに至った。

4足歩行

手老篤史氏(JST さきがけ)と共同で、4足歩行の数理モデルを構築し、身体と CPG との自然な相互作用によって、歩容遷移を再現した(図 5)。また現在、上記モデルよりも実機に近い数理モデルを作成し、実機作成に向けた準備を行っているところである。

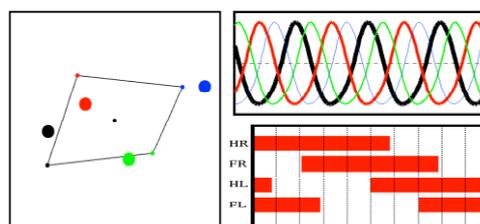


図 5. 4足歩行のシミュレーション(ウォーク)

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. K. Takeda, T. Umedachi, T. Nakagaki, R. Kobayashi, and A. Ishiguro: “Taming Many Degrees of Freedom: Fully Decentralized Control of a Soft-bodied Robot Inspired by True Slime Mold”, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) Workshop/Tutorial Proceedings, CD-ROM (2009)
2. W. Watanabe, T. Sato and A. Ishiguro, “A Fully Decentralized Control of a Serpentine Robot Based on the Discrepancy between Body, Brain and Environment”, Proc. of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2421-2426 (2009)
3. A. Ishiguro, T. Umedachi, T. Kitamura, T. Nakagaki and R. Kobayashi : “A fully decentralized morphology control of an amoeboid robot by exploiting the law of conservation of protoplasmic mass”, Proceedings of IROS WS 2008 (2009)
4. A. Tero, S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D.P. Bebbler, M.D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi, T. Nakagaki, “Rules for biologically-inspired adaptive network design”, Science, 327, 439-442 (2010) DOI: 10.1126/science.1177894
5. T. Umedachi, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi, and A. Ishiguro: “Fully Decentralized Control of a Soft-bodied Robot Inspired by True Slime Mold”, Biological Cybernetics, Vol.102, Issue 3, pp.261-269 (2010) DOI: 10.1007/s00422-010-0367-9
6. A. Tero, T. Nakagaki, K. Toyabe, K. Yumiki and R. Kobayashi : “A method inspired by Physarum for solving the Steiner problem”, International Journal of Unconventional Computing 6, 109-123 (2010)