

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。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つ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22年度は、以下のような研究を行った。

真正粘菌に対して光や薬物によるリスクを与え、それに対して粘菌がどのように適応的に反応するかを実験的に調べ、その結果を再現する数理モデルを構築した。これにより真性粘菌の環境適応のメカニズムの一部を明らかにした。アメーバ運動では、3次元計測システム、床反力の計測システム、レオロジー特性を測定する装置を開発した。また、アメーバ様ロボットとして流体回路を用いた新しいSlimy2号機を作成し、原形質量の保存性を1号機より飛躍的に高め、齟齬関数によるフィードバック、原型質量保存、**stiffness** 極性を組み合わせた制御の有効性を確認した。

1次元の這行に関する理論的な解析が進んだ。**RTS (Realtime Tunable Spring)**を直列になぐることにより離散力学モデルを構築し、その連続極限として「伸縮度」と「踏ん張り度」という2つの動変数を含んだ拡散型モデル方程式を提案した。このモデルの理論解析およびシミュレーションにより、2つの動変数の組み合わせ方と、這行の方向や運動効率の関係を明らかにした。また、現実の生物のモデリングやロボット設計において、どのようにして伸縮波を生成するかという問題と、どのようにして踏ん張りをコントロールするかという問題が独立に定式化された。

多種類の4足歩行動物の歩容を調査し、**duty** 比と **diagonality** という2つの指標を用いて解析を行ったところ、大型動物では **diagonality** が小さめであること、霊長類が他の動物群とかけ離れて 大きいことが明らかになった。平行して4足歩行ロボットを製作し、**discrepancy** に基づく位相フィードバックによる制御を行った。結果的に、各脚は荷重依存的に振動性と興奮性の間を遷移していることが明らかになった。

ヘビ型這行において **discrepancy** による **phasic** 制御と **tonic** 制御をロボット(HAUbot 2)に実装し、その有効性を確認した。さらに触覚や圧覚を備えたソフトボディを仮定し適当な反射を導入することで、障害物を積極的に利用することができることを、数理モデルによって示した。同様にソフトな足による表在感覚を利用した歩行が、高いロバスト性を持つことがわかった。

従来の自律分散制御においては、コントローラとして(盲目的に)結合振動子系が用いられる傾向があったが、現実の生物の観察を通して、そのことに関する疑義と反省が出てきており、次年度への大きな課題となった。

§2. 研究実施体制

(1) 小林グループ

① 研究分担グループ長: 小林 亮 (広島大学大学院理学研究科、教授)

② 研究項目

1. 真正粘菌の知的ロコモーションに関する実験とモデリング
2. 4足歩行動物の歩容のデータ収集と解析
3. 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
4. ヘビの運動制御に関する理論的考察
5. ミミズの運動制御に関する理論的考察
6. 腹足類の這行に関する数理モデルの構築

(2) 中垣グループ

① 研究分担グループ長: 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

1. アメーバの運動解析のための体変形・原形質流動・床反力の測定と解析。
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構成と論文執筆。
4. アメーバに学ぶ這行ロコモーションの一般化力学モデル。
5. アメーバの知的ロコモーション能(特に動的最適化能)の性能評価と論文執筆。

(3) 石黒グループ

①研究分担グループ長:石黒章夫(東北大学工学研究科、教授)

②研究項目

1. 流体回路を活用した原形質保存則を満足する粘菌様アメーバロボットの設計・製作
2. 位相制御と筋緊張制御の有機的な連関を可能とする自律分散制御則の考察とヘビ型ロボットへの実装
3. 深部体性感覚と表在感覚の両者を活用した自律分散制御則の考察
4. 四脚歩行ロボットの自律分散制御(Duty 比と **diagonality** の関係, 歩容遷移など)
5. 柔軟な足部から生み出される感覚情報を活用した二脚動歩行のための自律分散制御
6. ヒレや腹足の自発的運動パターンに内在する自律分散制御メカニズムの考察
7. ミミズの這行運動に内在する伸縮率制御の解明と多脚制御への展開
8. 小腸運動に内在する自律分散制御メカニズムの考察
9. クモヒトデが示す腕の自発的役割分担の発現機序の力学的解明

§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)

アメーバ運動の計測システム開発

アメーバ運動に伴う細胞変形と原形質流動の3次元計測システム、および床反力の測定システムを開発し計測を開始した。予備的な段階であるが、概ね後方で強く踏ん張っていることが観察された。この結果は、アメーバ運動に関する我々の仮説「前方は比較的に柔らかい」を支持するものである。さらに、アメーバ運動を細胞質のレオロジー特性、特に外力による変形に対する依存性(ずり依存性)を測定する装置をセットアップした。この測定により、体の変形すなわち運動が、体の力学特性をかえるというウエットなロコモーション制御の核心に迫れるであろう。

真正粘菌の知的ロコモーション

光照射による空間的かつ時間的な変動環境下での真正粘菌の振る舞いを調べた。光照射の交替周期に依存して体型が変わることから、粘菌は時間空間的なリスクマネジメントをしていることが示された⁵⁾。また、粘菌が弱い毒物に遭遇した時、個体により乗り越えるか戻るかを選択する。この力学機構を決定論的な数理モデルにより提案した⁷⁾。さらに、粘菌の知的ロコモーション能力について、現状を俯瞰しまとめた¹¹⁾。

1次元的這行運動の力学的理論

多細胞生物が地面を這う場合、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いる。ミミズやカタツムリのような1次元的這行を行う動物においては、伸縮運動が体全体を波のように伝播する。1次元的這行のモデルが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った。



図1 アメーバ様ロボット (Slimy 2)

アメーバ様ロボット

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^{1,4)}。シミュレーションを通して、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と局所的齟齬の解消の結果として、環境適応的な運動機能が創発していることを示した。図1は閉ループ状に流体回路により、原型質量保存則が成り立つように設計したアメーバ様ロボット2号機である。



図2 ヘビ型ロボット (Haubot 2)

ヘビの運動

ヘビの運動の理解と再現は、身体を持つ大自由度の使いこなし、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、本プロジェクトの重要なターゲット

である。結合振動子系をコントローラとする枠組みの元で、齟齬関数による Phasic な制御と Tonic な制御を併用した自律分散制御則によるシミュレーションを行ない、その有効性を確認した。また、その妥当性を検証するために、図2に示すようなヘビ型ロボットを製作した¹²⁾。実験の結果、スムーズな蛇行運動の発現のみならず、各体節の動きの位相関係と筋緊張度を状況依存的に連関させることで、優れた環境適応能力と耐故障性も併せ持つことが示された。さらに、ロボットの身体を柔軟素材で構成し、これから生み出される可変形性に基づく表在感覚と深部体性感覚を CPG へフィードバックすることで、実際のヘビと同様に、環境を足がかりとするロコモーションを実現する数理モデルを構築した。図3にシミュレーション結果を示す。次年度では、このヘビロボットの設計・製作を目指す。

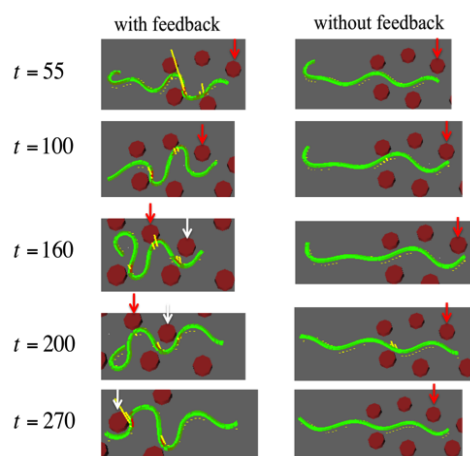


図 3 Obstacle-aided locomotion

4足歩行

多種類のは乳類の4足歩行の歩行データを収集し、歩容の分析と比較を行った。その結果、霊長類とその他の動物群の間に大きな違いがあることが明らかになった。

齟齬関数に基づく自律分散制御則の設計スキームを 4 足歩行ロボット(図 4)に適用して、その妥当性を検証した。定式化された CPG の振る舞いは、アクティブローテータとして解釈できることも明らかになった。すなわち、リズム的な歩行運動の背後には、各脚への荷重に依存した振動性と興奮性の切り替えが存在する可能性を強く示唆している。さらに、この制御スキームによって、デューティ比と *diagonality* の分布関係や、ウォーク、トロット(ペース)、ギャロップなどの異なる歩容間の自発的遷移に関しても統一的に説明できることが示されつつあり、次年度ではその実験的実証を目指す。

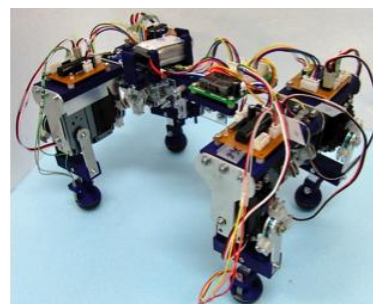


図 4 4 足歩行ロボット

2足歩行・走行

完全受動走行ロボットを作成し、長時間走行させることに成功した¹⁰⁾。また、足部に柔軟性を持たせ、その変形から生み出される表在感覚情報に応じて、コントローラの特長(振動性と興奮性)を変化させることで適応的動歩行を生成する手法を提案した。図 5 より本手法が強力な頑健性を持つことがわかる。

その他

Multi-rhythm oscillator を用いて1次元ホッピングロボットを設計し、この制御方式の有効性を示した^{3,9)}。また、アリの作る輸送ネットワークの形成に関する研究を行った⁸⁾。

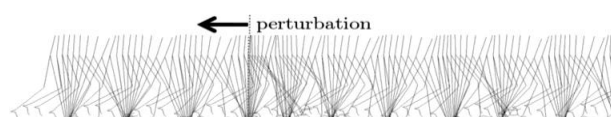


図 5 提案手法による歩行シミュレーション

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Takuya Umedachi, Koichi Takeda, Toshiyuki Nakagaki, Ryo Kobayashi, and Akio Ishiguro, “Fully Decentralized Control of a Soft-bodied Robot Inspired by True Slime Mold”, *Biological Cybernetics*, 102-3(2010), 261-269. DOI 10.1007/s00422-010-0367-9
2. Masahiro Shimizu and Akio Ishiguro, “Amoeboid Locomotion Having High Fluidity by a Modular Robot”, *International Journal of Unconventional Computing*, 6-2(2010), 145-161
3. 大脇 大, 坂井善行, 石田 怜, 手老篤史, 石黒章夫, 運動安定化と運動探索をシームレスに統合可能なマルチリズムオシレータモデルの提案 ―次元ホッピングロボットの跳躍運動への適用―, 計測自動制御学会論文集, 46-9 (2010), 562-571
4. 梅舘拓也, 武田光一, 中垣俊之, 小林 亮, 石黒章夫, 真正粘菌変形体から着想を得た自律分散制御方策の実験的検証, 計測自動制御学会論文集, 46-11 (2010), 706-712
5. Kentaro Ito, David Sumpter, Toshiyuki Nakagaki : “ Risk management in spatio-temporally varying field by true slime mold”, *NOLTA (Nonlinear Theory and Application) journal, IEICE*, vol.1 (2010), 26-36
6. Tomoyuki Miyaji, Isamu Ohnishi, Ryo Kobayashi and Atsuko Takamatsu : “Mathematical analysis to coupled oscillators system with a conservation law”, *RIMS Kokyuroku Bessatsu*, B21 (2010), 129-147
7. 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
8. Tanya Latty, Kai Lamsch, Kentaro Ito, Martin Middendorf, Toshiyuki Nakagaki, Madeleine Beekman: “Construction of self-organized transportation networks in the polydomous Argentine ant”, *Journal of The Royal Society, Interface*, doi:10.1098/rsif.2010.0612, 2011
9. Dai Owaki, Satoshi Ishida, Atsushi Tero, Kentaro Ito, Koh Nagasawa, and Akio Ishiguro, An Oscillator Model That Enables Motion Stabilization and Motion Exploration by Exploiting Multi-rhythmicity, *Advanced Robotics*, 25-8, 9 (2011) (in

press)

10. Dai Owaki, Masatoshi Koyama, Shin'ichi Yamaguchi, Shota Kubo, and Akio Ishiguro, A Two-Dimensional Passive Dynamic Running Biped with Elastic Elements, IEEE Transaction on Robotics, 27-1, pp.156-162 (2011)
11. Yoshimi Tanaka, Toshiyuki Nakagaki: "Cellular computation realizing intelligence of slime mold *Physarum polycephalum*", Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol. 8, 383-390 (2011). invited review, DOI: 10.1166/jctn.2011.1702
12. 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 (accepted).