

真正粘菌変形体から探るソフトロボットの制御論

Autonomous Decentralized Control of Soft-bodied Robots Inspired by True Slime Mold

○梅館拓也 (広島大学, JST CREST, JSPS), 出井遼 (東北大学), 中垣俊之 (はこだて未来大学, JST CREST), 小林亮 (広島大学, JST CREST), 石黒章夫 (東北大学, JST CREST)

Takuya UMEDACHI, Hiroshima University / JSPS / JST CREST, umedachi@hiroshima-u.ac.jp
Ryo IDEI, Tohoku University
Toshiyuki NAKAGAKI, Future University Hakodate / JST CREST
Ryo KOBAYASHI, Hiroshima University / JST CREST
Akio ISHIGURO, Tohoku University / JST CREST

This paper presents a soft-bodied amoeboid robot inspired by plasmodium of true slime mold as a case study of autonomous decentralized control for soft-bodied robots. Significant features of this control method are threefold: (1) implementing elastic actuator (i.e. real-time tunable spring) which generate discrepancy between the control value and actual value; (2) embedding long-distance physical interaction stemming from form and truly soft and deformable body; (3) local sensory feedback based on the discrepancy of the elastic actuators. Experimental result shows that this robot exhibits truly supple locomotion without relying on any hierarchical structure. The result obtained is expected to shed new light on design scheme for autonomous decentralized control system for soft-bodied robots.

1. はじめに

生物の身体は超多自由度あるいは大変形可能な連続体的材質により構成されており, それらの変形や柔らかさを巧みに制御することで予測不能的に変動する実世界環境下において優れた実時間適応性を示す. このような知を発現する生物制御のからくりを理解し, あたかも生物のごとく柔らかくしなやかに動き回ることのできるロボットを創り出すことが本研究の究極の目的である. このような超大自由度のシステムの場合, 身体の各部所同士の物理的相互作用に加えて, 身体と外部環境との物理的相互作用 (地面との摩擦や生物の周りを流れる流体など) まで考慮する必要がある. しかしながら, そのような相互作用を全てを数値計算することも, それら数値計算やセンサ情報に基づき各自由度を中央集権的に制御することも, 非常に困難であると言わざるを得ない.

このような超大自由度のシステムを扱うには, 身体の各要素に単純な知覚・判断・行動出力の機能を持つ要素 (自律個) を埋め込み, それら同士の身体/外部環境を介した協調関係を設計することで, システム全体の振る舞いを発現させる方が現実的であると考えられる. このような制御は自律分散制御と呼ばれ, 大自由度系を扱う制御方策として近年着目されている. また, 原初的な生物から比較的高等な生物にいたるまで, このような制御則が埋め込まれている可能性が明らかになりつつあり [1, 2], 高い適応性を有するロボットの設計に際して, 強力なツールとなることが期待されている.

しかしながら, 自律分散制御に関する体系的な設計論はまだまだ存在していないのが現状である. なぜならば, 協働的振る舞いを発現するための「個 (自律個)」と「全体 (自律個集団, 目的など)」をつなぐロジックが依然として欠如しているためである. ここで, 個と全体をつなぐロジックを構成する自律分散制御の設計は以下の3点に集約される:

- (1) 自律個に実装するダイナミクス
- (2) 自律個間の相互作用様式
- (3) 制御系と機構系の連関様式

上記 (1) と (2) に関しては, 結合振動子系を用いた歩行運動制御などの既存研究において議論されてきた [3][4]. 一方で, (3) に関しては各事例ごとにアドホックかつテーラーメイドに設計され

ているのが現状である. このような事実を踏まえると, 特に (3) に関する体系的な考察が喫緊の課題であると筆者らは考える.

そこで, 筆者らは最低限の設定から基本論理を探るという, いわゆるミニマリストアプローチを採用し, きわめて原初的な生物である真正粘菌変形体に着目した. 真正粘菌変形体は以下の理由から, 生物学的のみならず, ロボット工学的にも非常に興味深いモデル生物である. まず, 脳や神経系といった中枢神経システムや特別な器官を持たずとも, 無限定環境に対して高い適応性を示す. また, 結合振動子系でモデル化できることから [5], 完全な自律分散制御でロコモーションを生成していることが知られている. さらにその身体的特徴に着目すると, 柔軟な身体と内質である原形質の量が保存されること (原形質量保存則) によって身体部位間に力学的な長距離相互作用を生起させている (ウォーターベッドの一方を押すと, 反対側が膨らむ様子を想像してもらいたい). つまり, 真正粘菌変形体は個と全体をつなぐロジックの核をすでに身体に内在しているモデル生物であるといえる. このように意図的に原初的な生物に着目することで, 制御系と機構系の連関様式に関する体系的な設計論を効果的に議論することができる.

そこで本発表では, ソフトロボットの制御論を議論するために, 主に真正粘菌変形体に着想を得たアメーバ様ロボット実機 Slimy II を1つのケーススタディとして紹介する. このロボットの最大の特徴は, (1) 外皮に受動性と能動性を兼ね備えたアクチュエータである可変弾性要素を実装していること, (2) 原形質として流体を封入し, 力学的な長距離相互作用を生起させる機構を有していること, (3) 上記の機構性の柔らかさを活用することで抽出可能な制御系と機構系に生じる齟齬に着目し, それらの齟齬が小さくなるように局所センサフィードバックが設計されていること, の3点である. さらに, 本稿では紙面の都合で本稿には載せられなかったが, Slimy 同様のソフトロボットの制御方策を, 別の形態のロボットに適用した例も紹介する.

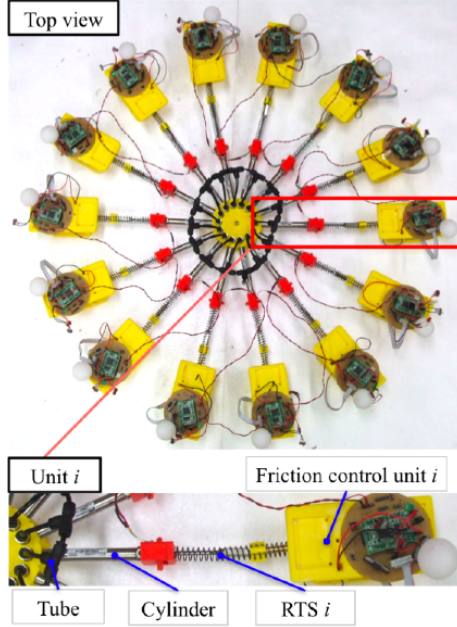


Fig. 1 The real physical robot, Slimy II. The robot consists of the RTSes, the friction control units and the fluidic circuit (the cylinders and the tubes).

2. 提案手法

2.1 機構系の設計

本稿で提案するアメーバ様ロボットの特徴は、原形質量保存則を満たす流体回路と伸縮運動可能な外皮により構成されることにある。具体的には、Fig. 1 に示すシリンダとチューブの内部に空気を密封することで原形質量保存則を満たす流体回路とした。さらに、放射状に配置したシリンダの端点に変調弾性要素 (Real-time Tunable Spring: RTS) をつなぎ合わせ、接地摩擦制御ユニットと接続することで外皮を形成する。この変調弾性要素の自然長を動的に改変させることにより、原形質の吸入/排出を行う。ここで、Fig. 1 に示す変調弾性要素 i と接地摩擦制御ユニット i をまとめてユニット i と定義する。本稿では、それぞれのユニットに位相振動子を実装しその位相情報 θ_i に基づいて、自律分散的にロコモーションを生成することを目的とする。下記に機構系の詳細を示す。

2.1.1 変調弾性要素

本稿で採用する変調弾性要素 (Fig. 2) は、弾性体の有効長を動的に改変することにより自然長を制御する。この変調弾性要素はコイルバネ、DC モータ、巻き取り/送り出し機構、圧力センサから構成される。DC モータでコイルバネを強制的に巻き取ったり (Fig. 2(a)), 送り出したり (Fig. 2(b)) することでコイルバネの有効長 $l_i^{RTS}(\theta_i)$ の改変を実現している：

$$l_i^{RTS}(\theta_i) = \bar{l}_i(1 - a \cos \theta_i). \quad (1)$$

ここで、 \bar{l}_i は変調弾性要素の平均自然長、 a は変調弾性要素の自然長変動の振幅を規定する定数である。また変調弾性要素 i のバネ定数 $k_i^{RTS}(\theta_i)$ は、有効長の改変にもなって以下のように記述される：

$$k_i^{RTS}(\theta_i) = \frac{\alpha}{l_i^{RTS}(\theta_i)}. \quad (2)$$

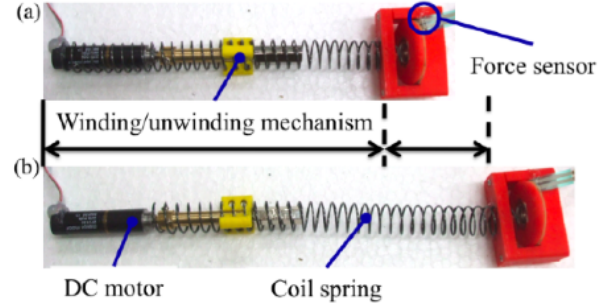


Fig. 2 The RTS can alter its resting length at any time by winding/unwinding the coil spring. (a) Wound state. (b) Unwound state.

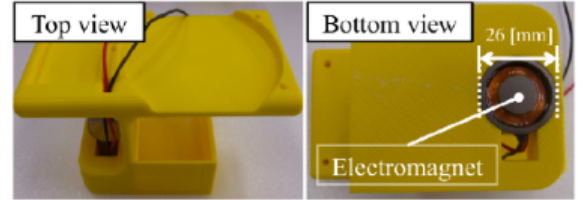


Fig. 3 The friction control unit. The electromagnet is implemented in the bottom of the unit in order to switch between the anchor mode and anchor-free mode.

式 (2) 中の α はコイルバネの幾何学的特性 (有効巻き数, コイル径, バネの線径) と材料特性により求められる定数である。

さらに、変調弾性要素に実装された圧力センサにより、変調弾性要素に加わる張力 T_i を計測し、式 (3) より間接的に変調弾性要素の実際の長さ l_i を検出することができる：

$$T_i = k_i^{RTS}(\theta_i)(l_i - l_i^{RTS}(\theta_i)). \quad (3)$$

このような受動性と能動性を兼ね備えたアクチュエータを実装することで、制御系と機構系の間に生じる齟齬を張力 T_i として検出することができる。

2.1.2 接地摩擦制御機構

本アメーバ様ロボットは、接地摩擦モードの切り替えタイミングを適切に制御することでロコモーションを生成する。本稿では簡単化のため、ロボットを鉄板上に置き、各ユニットの底面に電磁石を実装することで接地摩擦制御機構とした (Fig. 3)。この接地摩擦機構は、電磁石に印可する電圧を高めることで地面と固着して接地摩擦を高める anchor-mode と、電圧を低めることで自由に運動可能な anchor-free mode の 2 つのモードを有する。式 (4) のように上記 2 つのモードを各振動子の位相 θ_i に対応させて接地摩擦を制御する：

$$\begin{cases} \text{anchor mode} & \Theta \leq \theta_i \leq \Theta + d\Theta \text{ の場合} \\ \text{anchor-free mode} & \text{その他.} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 Θ , $d\Theta$ はそれぞれ anchor-mode を開始するタイミング, anchor-mode の長さを規定するパラメータである。

2.2 制御系の設計

本節では上記に示したアメーバ様ロボットが、安定的に誘引刺激に対してロコモーションを生成するための制御系を説明する。そのためには、各ユニットにおける変調弾性要素の自然長と接地摩擦制御ユニットの摩擦タイミングを、適切かつリズムに制

御する必要がある。そこで本稿では、以下に示す振動子の位相に基づいて可変弾性要素や接地摩擦の制御を行う [6][7]：

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega + f(\theta_{i+1}, \theta_i, \theta_{i-1}) + g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i)). \quad (5)$$

ここで、 θ_i はユニット i に実装された振動子 i の位相、 ω は振動子の固有角速度である。 $f(\theta_{i+1}, \theta_i, \theta_{i-1})$ は振動子間の拡散的相互作用項、 $g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i))$ は局所センサフィードバック項を表す。 ω はすべての振動子で同一とした。したがって、ロコモーションを生成するための位相調整は $f(\theta_{i+1}, \theta_i, \theta_{i-1})$ および $g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i))$ の 2 項のみで行われ、さらに以下の要請を満たすように設計を行う必要がある：

- 近接したユニットどうしは同相的に振る舞い、協調して原形質の吸入／排出を行う (2.2.1 で説明).
- 離れたユニット群の振動子どうしは原形質を介して相互作用し、協調的に原形質を吸入／排出することで原形質を効果的に輸送する (2.2.2 で説明).
- 誘引刺激に向かって逆相的な振る舞いが生起され、走性を示す (2.2.3 で説明).

2.2.1 拡散的相互作用項 $f(\theta_{i+1}, \theta_i, \theta_{i-1})$

近接ユニットどうしが同相的に振る舞うように、各ユニットの振動子に拡散的相互作用項を導入した：

$$f(\theta_{i+1}, \theta_i, \theta_{i-1}) = \varepsilon_c \sum_{j=i-1, i+1} \sin(\theta_j - \theta_i). \quad (6)$$

ここで、 ε_c は隣接する振動子どうしの結合強度である。このような拡散的相互作用項を導入することで、近接するユニット間における可変弾性要素の伸縮、地面との摩擦力の増減を同相的に行い、協調して原形質の吸入／排出を行うことができる。

2.2.2 局所センサフィードバック項 $g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i))$

離れたユニット群の振動子どうしが原形質を介して相互作用するように $g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i))$ を設計する。以下では齟齬関数 [7] に基づく局所センサフィードバック項の設計方針を示す。

まず齟齬関数を設計する。各ユニットは、振動子の位相によって可変弾性要素の自然長を改変させる。しかし、本アメーバ様ロボットでは原形質量保存則と可変弾性要素の受動性を有するため、可変弾性要素の自然長 $l_i^{RTS}(\theta_i)$ と実際の長さ l_i の間には齟齬が生じる。この齟齬を T_i (式 (3)) として圧力センサで検出する。このようにして検出した齟齬を用いて、下記のように齟齬関数を設計した [7]：

$$I_i = \frac{\sigma}{2} T_i^2 = \frac{\sigma}{2} \{k_i^{RTS}(\theta_i)(l_i - l_i^{RTS}(\theta_i))\}^2 / 2. \quad (7)$$

ここで σ はフィードバック強度を決定する係数である。この齟齬関数は、各ユニットが有する局所情報のみで計算されるものであり、制御系・機構系・環境間の齟齬を検出するものである。生物の振る舞いは、各自律個がこれらの齟齬を局所的に減少させた結果として創発する、というのが本研究の作業仮説である。生物の身体性やロコモーションに応じて様々な齟齬が考えられるが、本研究ではウォーターベッドのような身体を有する真正粘菌変形体に着目しているため、可変弾性要素に生じる張力 (式 (3)) を用いて定義するのが妥当であると考えた。

次に局所センサフィードバックを設計する。各ユニットが式 (7) で求めた I_i を小さくするように、自身の位相 θ_i を調整する局所センサフィードバック項 $g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i))$ を設計した [7]：

$$g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i)) = -\frac{\partial I_i}{\partial \theta_i} = \sigma \alpha^2 \left(\frac{l_i}{l_i^{RTS}(\theta_i)} - 1 \right) \frac{l_i \bar{l}_i a \sin \theta_i}{l_i^{RTS}(\theta_i)^2}. \quad (8)$$

この局所センサフィードバックは各ユニットがそれぞれ入手可能な情報のみを用いているにもかかわらず、各ユニットの振る舞いとアメーバ様ロボット全体の振る舞いを整合的につなぐ役割を果たす。なぜならば、本アメーバ様ロボットが有する力学的長距離相互作用が個と全体をつなぐ役割を果たしているためである。ここで留意すべきことは、身体の柔らかさなしではこの長距離相互作用を効果的に活用することができない、という点である。

2.2.3 Symmetry-breaking メカニズムの導入

誘引刺激に向かって逆相的な振る舞いが生起されて走性を示すように Symmetry-breaking メカニズムを導入する (Fig. 4)：

$$\bar{l}_i = \begin{cases} \bar{l}_a & \text{誘引刺激を検知したユニット} \\ \bar{l}_p & \text{その他.} \end{cases} \quad (9)$$

ただし、 $\bar{l}_a > \bar{l}_p$ とする。つまり、誘引刺激を検知したユニットは、可変弾性要素の平均自然長 \bar{l}_i を増加させることで、 $k_i^{RTS}(\theta_i)$ を減少させるものとする (式 (2) 参照)。このメカニズムを導入することにより、誘引刺激に対して前後のユニット間で原形質を吸入／排出する力のバランスが崩れるために逆相的な振る舞いが生起し、走性を示すことが可能となる。ここで各可変弾性要素は、誘引刺激の有無によって \bar{l}_i を変更しているに過ぎないことに注目されたい。このようなメカニズムを導入することで、制御系を複雑にすることなしに、合目的なロコモーション生成が可能となっている。また、前方の外皮が後方の外皮と比べて柔らかくなることで、行動主体が未知の環境に対処しやすくなるという利点がある。次節に実機によるロコモーション実験を示す。

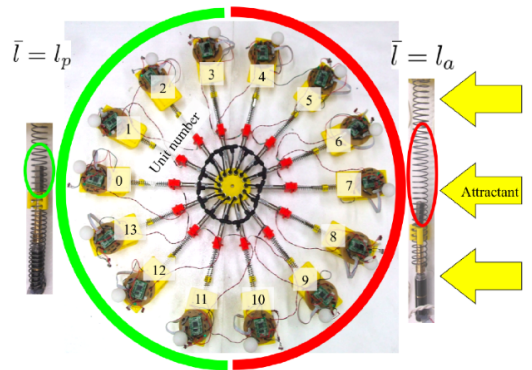


Fig. 4 Implementation of the symmetry-breaking mechanism.

3. 実験結果

3.1 実験設定

われわれのモデルの妥当性を検証するための実機実験を行ったので報告する。具体的には、Slimy II が力学的長距離相互作用と局所センサフィードバックを用いて、適切に位相を調整しながらロコモーションを生成することを確認する。以下に実験設定を示す：

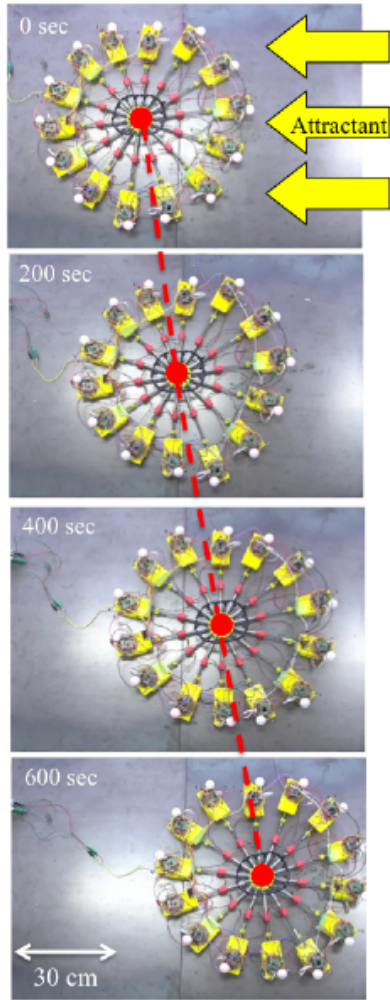


Fig. 5 Locomotion experiment of Slimy II . The red dot-line describes the trajectory of the center over time (see from top to bottom in each figure).

初期設定: ユニット数 = 14 ; 初期位相 $\theta_i = 0.0[\text{rad}]$.

パラメータ: $l_a = 90[\text{mm}]$; $l_p = 70[\text{mm}]$; $a = 0.5$;
 $\omega = 0.14 [\text{rad}/\text{sec}]$; $\Theta = \pi/2[\text{rad}]$; $d\Theta = \pi[\text{rad}]$.

3.2 ロコモーション実験

ロコモーション実験の結果を Fig. 5 に示す。スナップショットから Slimy II は誘引刺激の方向へ安定的にロコモーションを生成していることが確認できる。このロコモーション実験において Fig. 4 のユニット番号 0 から 1 つおきに 7 個のユニットを抽出し、それらの位相データの時間発展を Fig. 6 に示す。同図からわかるように、力学的長距離相互作用と柔らかな身体を活用した局所センサフィードバックによって位相調整を行い、安定して逆相的に振る舞ってロコモーションを生成していることがわかる。

4. まとめと今後の課題

真正粘菌変形体をモチーフにしたアメーバ様ソフトロボットをソフトロボットの制御論のケーススタディとして紹介した。具体的には、原形質量保存則により生起される力学的長距離相互作用と柔らかな身体を活用した齟齬関数に基づく局所センサフィードバックにより、物理的に離れたユニットどうしが位相調整を行いロコモーションを生成することをお見せした。本稿で提案した

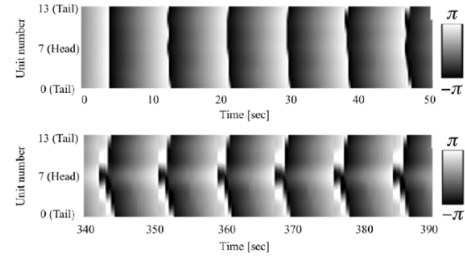


Fig. 6 The spatio-temporal pattern of phase of the oscillators.

制御系と機構系の連関様式に関する設計スキームは、ヘビ型ロボットに用いても有効に機能することが示されており [8][9]、別の形態にも適用可能であると考えられる。今回得られた結果は、物理実体を持つロボットと数理モデリングを組み合わせた生物制御の解明をすすめる上で有用な知見を与えると考えられる。

謝辞

広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻伊藤賢太郎助教からは、本研究に対し数々の貴重なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

文献

- [1] S. Grillner, O. Ekeberg, A. Manira, A. Lansner, D. Parker, J. Tegner, and P. Wallen, "Intrinsic function of a neuronal network - a vertebrate central pattern generator", *Brain Res. Reviews.* vol. 26, pp.184-197, (1998).
- [2] R. Pfeifer and C. Scheier, "Understanding Intelligence", The MIT Press, (1999).
- [3] G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu. "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators", *Biol. Cybern.*, vol. 65, pp.147-159, 1991.
- [4] H. Kimura, Y. Fukuoka, and H. Nakamura. "Biologically inspired adaptive dynamic walking of the quadruped on irregular terrain", *Proc. of ISRR99*, pp.271-278, 1999.
- [5] A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii, and I. Endo. "Spatio-temporal symmetry in rings of coupled biological oscillators of Physarum plasmodium", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, 078102, 2001.
- [6] R. Kobayashi, A. Tero, and T. Nagasaki, "Mathematical Model for Rhythmic Protoplasmic Movement in the True Slime Mold", *Mathematical Biology*, vol. 53, pp.273-286, 2006.
- [7] T. Umedachi, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, "Fully Decentralized Control of a Soft-bodied Robot Inspired by True Slime Mold", *Biol. Cybern.*, vol 102, pp.261-269, 2010.
- [8] 佐藤貴英, 渡邊航, 石黒章夫, "制御系・機構系・環境間齟齬を活用したヘビ型ロボットの自律分散制御", 第27回日本ロボット学会学術講演会学会予稿集 CD-ROM, RSJ2009AC1M2-04, 2009.
- [9] 加納剛史, 佐藤貴英, 小林亮, 石黒章夫, "位相制御と筋緊張制御の有機的整合を可能とする自律分散制御則～ヘビ型ロボットを用いた事例研究～", 第22回自律分散システム・シンポジウム 資料, pp159-164, 2010.