

# 真正粘菌変形体に着想を得た静水力学的骨格を有する 超軟性アメーバ様ロボット

## Highly Deformable Amoeboid Robot with Hydrostatic Skeleton Inspired by Plasmodium of True Slime Mold

○出井 遼\*, 梅舘 拓也\*\*,†,‡, 伊藤 賢太郎\*\*, 石黒 章夫\*,‡

○Ryo Idei\*, Takuya Umedachi\*\*,†,‡, Kentaro Ito\*\* and Akio Ishiguro\*,‡

\*東北大学, \*\*広島大学, †JSPS, ‡JST CREST

\*Tohoku University, \*\*Hiroshima University, †JSPS, ‡JST CREST

**キーワード** : 静水力学的骨格 (Hydrostatic skeleton), 真正粘菌変形体 (True slime mold),  
自律分散制御 (Autonomous decentralized control),

局所センサーフィードバック制御則 (Local sensory feedback control), 齟齬関数 (Discrepancy function)

**連絡先** : 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2丁目1-1 東北大学 電気通信研究所 2号館4階 W406  
東北大学電気通信研究所 石黒研究室 出井遼,

Tel.:022-217-5465, Fax.:022-217-5464, E-mail: idei@riec.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

現在の人工物は、所与のタスクや環境に対して非常に特化した設計がなされているため、その振る舞いの多様性は著しく限定されているのが一般的である。一方で生物は、多様な振る舞いを自己組織的に発現し、自身の置かれた環境に応じて適切にそれらを切り替えることができる。このような知を有することで、生物は動的に変動する環境（無限定環境）下において、柔軟かつ適応的に振る舞うことができる。したがって、生物が有するこのような知の様式の発現機序を解明することは、生物制御のからくりの理解の深化のみならず、真の意味で「多芸多才」な人工物の構築にもつながると期待される。

そのためにまず著者らは、もっとも原初的と考えられる単細胞生物に立ち返ることにし、真正粘菌変形体に注目した。真正粘菌変形体は、身体全体にメカノケミカルな振動子が分布しており、その収縮振動に起因して生じた圧力の勾配によって原形質を流動させながら運動している。単細胞生物ゆえに、脳や神経のような情報を処理する中枢は存在しない。それにもかかわらず、この生物は自身の形態に応じて多様な振動モードを発現し<sup>1)</sup>、これらモード間を自発的に遷移する<sup>2)</sup>。真正粘菌変形体は多様な振動モードを発現するメカニズムを活用することで、柔軟かつ適応的な振る舞いを実現しているのではないかと考えられる。それゆえに真正粘菌変形体には、多芸多才な運動知の原型が内在していると考えられる。

とができ、このような知の様式を議論する上で得難いシンプルベストなモデル生物であると言える。

そこで著者らは、このモデル生物の有する知の発現機序の鍵となるものとして、(1)真正粘菌変形体の振動子群が有する力覚情報に基づいたリズム調整機能<sup>3)</sup>、(2)原形質を介した物理的な振動子間相互作用、の二つに着目した。本研究ではこのような自律分散システムを工学的に実現し検証することで、真正粘菌変形体の多芸多才な振る舞いの発現機序を解明する。

そのために著者らは、力覚情報によるリズム調整機能を有した駆動デバイスを実装し、原形質を介した物理的な相互作用によって多様な振る舞いを生成するアメーバ様ロボット実機を開発した。実験により、真正粘菌変形体の示す多様な振動モードとその遷移を再現することに成功した。さらに誘引刺激がないところでは周囲を探索し、誘引刺激があればその方向に向かうといった質的に異なる振る舞いの選択を制御則の切り替えなしに実現したので報告する。

## 2. 提案手法

### 2.1 機構系の設計

本稿で提案するロボットの機構系について説明する。Fig. 1のように、一対のアクチュエータとシリンダから構成される機械要素を1モジュールと定義する。モジュール $i$ には振動子を二つ実装し、それぞれの位相情報 $\phi_{i,n}$  ( $n = l, r$ )に基づいてアクチュエータを制御する (Fig. 1 (a)参照)。またロボットは、これら複数のモジュールとそれらを結ぶチューブから構成されている。本研究では柔軟性を有したアクチュエータによりシリンダロッドを上下運動させ、

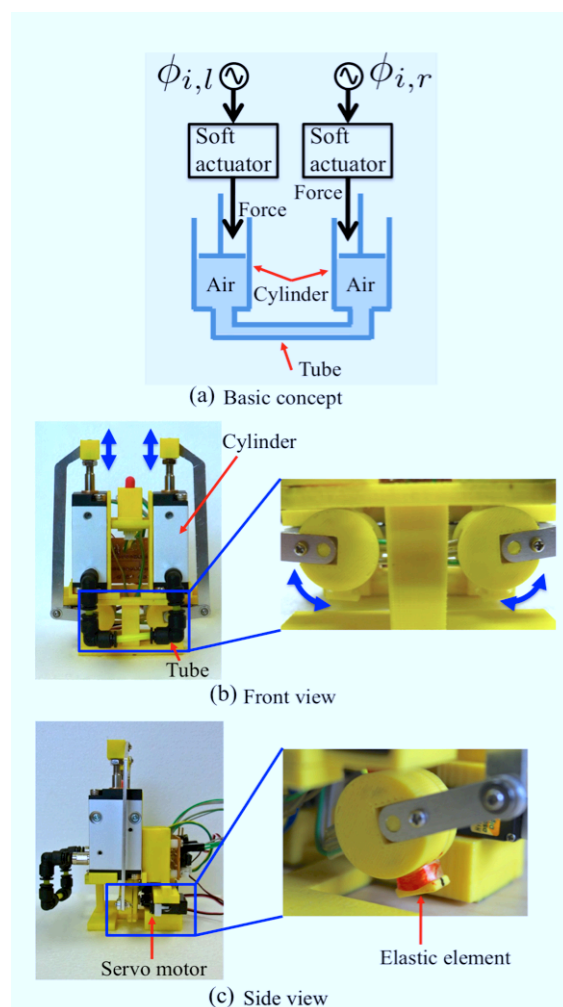


Fig. 1 Schematic of module proposed.

シリンダ内の空気（原形質）を吸入・排出することで、原形質流動が生じられるようにモジュールを設計した (Fig. 1 (b)参照)。以下、詳細を示す。

#### 2.1.1 柔軟性を有したアクチュエータ

本ロボットは、各サーボモータと自身の駆動対象であるシリンダロッドとを、弾性要素を介して間接的に結合することでアクチュエータに柔軟性を持たせている (Fig. 1 (c)参照)。このことにより、サーボモータの制御角（目標回転角度）と実際の角度との間に生じるずれ（齟齬）を力覚情報として活用することが

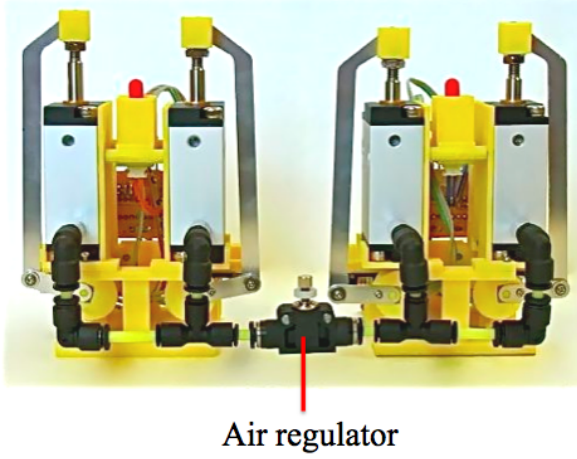


Fig. 2 Schematic of robot composed of two modules.

できる。この詳細は2.2節で説明する。

当該モジュール内の一対のサーボモータは、各振動子の位相 $\phi_{i,n}$ に基づいて制御する。モジュール $i$ のサーボモータの目標回転角度 $\bar{\theta}_{i,n}$ は、振動子の位相 $\phi_{i,n}$ と以下のように対応させる：

$$\bar{\theta}_{i,n}(\phi_{i,n}) = a \sin \phi_{i,n}. \quad (1)$$

ここで、 $a$ はサーボモータの目標回転角度の振幅を規定する定数である。

### 2.1.2 原形質流動

本研究では、Fig. 2のようにモジュールどうしをチューブと制御弁とでつないだ。各モジュールどうしはそれらをつなぐチューブを介して原形質の吸入・排出を行う。このように、シリンダとチューブの内部には原形質として空気を密封しているため、保存量が存在する。そのため、モジュール間で長距離相互作用を生起させることが可能となる。またこの制御弁により、チューブの流路抵抗を手動で調整できるものとした。

## 2.2 制御系の設計

上記に示したロボットが、多様な時空間振動パターンを生起させるための制御系を説明する。本稿では、以下に示す振動子の位相に基づいてサーボモータの制御を行う<sup>4)5)</sup>：

$$\dot{\phi}_{i,n} = \omega_n - \frac{\partial I_{i,n}}{\partial \phi_{i,n}}. \quad (2)$$

$\omega_n$ は振動子の固有角速度であり、右辺第2項は機構系からの局所センサフィードバックを示す。 $I_{i,n}$ は齟齬関数であり、これは制御系と機構系の間を生じるずれ（齟齬）を特徴づける、局所的に検出可能なセンサ情報をもとに構成される関数である。ここで、1モジュールに実装された各振動子どうしの相互作用は、機構系を介してのみであることに注目されたい。以下で、この齟齬関数に基づく局所センサフィードバック項の詳細を示す。

真正粘菌変形体は細胞膜の伸展により局所で張力が検出されると、細胞膜にかかる張力に応じて収縮リズムを調整することが知られている<sup>5)</sup>。つまり原形質からの圧力が高ければ、外皮は収縮しようとしても弛緩することとなる。上記の生物学的知見から、齟齬関数を以下のように設計することで、原形質からの圧力に応じた位相修正が可能となる：

$$I_{i,n}(\tau_{i,n}) = \frac{\sigma}{2} \tau_{i,n}^2. \quad (3)$$

ここで $\sigma$ はフィードバック強度を決定する係数である。齟齬関数は、 $\bar{\theta}_{i,n}$ とアクチュエータの実際の角度 $\theta_{i,n}$ との間に生じるずれによって発生するトルク $\tau_{i,n}$ の2乗により記述するものとした。 $\tau_{i,n}$ は以下の式で記述できる：

$$\tau_{i,n} = k(\theta_{i,n} - \bar{\theta}_{i,n}(\phi_{i,n})). \quad (4)$$

$k$ は弾性係数である。この $\tau_{i,n}$ は、アクチュエータに柔軟性を持たせることにより抽出可能な

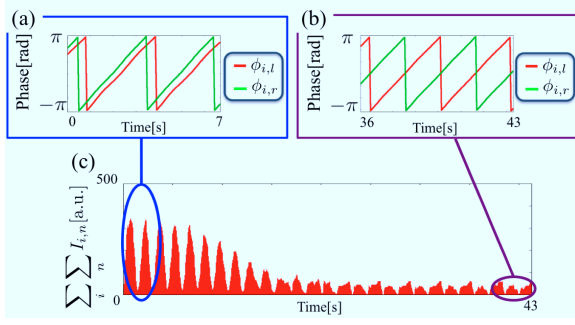


Fig. 3 Representation data of transition of oscillatory patterns on one module. (a) and (b) show time evolution of phases of the oscillators at 0-7 [s] and 36-43 [s], respectively. (c) shows time evolution of  $\sum_i \sum_n I_{i,n}$ .

力覚情報であることに注目されたい (2.1.1参照)。つまり、サーボモータとシリンダとを弾性要素を介して間接的に結合することで、制御系と機構系との間に生じる齟齬を $\tau_{i,n}$  (力覚情報) として検出することができる。またこの局所センサフィードバックは、各モジュールがそれぞれ入手可能な局所情報のみを用いて位相調節を行っているにすぎないことに注目されたい。次節で実機による実験結果を示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 1モジュールでの実験

まず齟齬関数を減少させる局所センサフィードバックが機能するかどうかを確認するために、1モジュールで実験を行った。Fig. 3にその結果を示す。各振動子の位相 $\phi_{0,l}$ ,  $\phi_{0,r}$ は同相に近い状態から始めたが、振動子間の位相はやがて反対位相となり、齟齬関数の総和が減少したことがわかる。

以下に実験設定を示す: $\omega_n = 0.3$  [rad/s] ( $n = l, r$ );  $\sigma = 0.005$  [a.u.];  $\phi_{0,l}(t=0) = 0.0$  [rad];  $\phi_{0,r}(t=0) = \pi/6$  [rad].

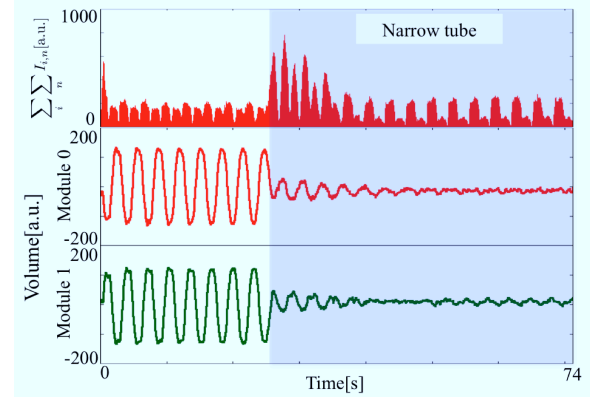


Fig. 4 Representation data of transition of oscillatory patterns on two modules. These show time evolution of  $\sum_i \sum_n I_{i,n}$  (top) and volumes of the modules (middle and bottom) at 0-74[s], respectively.

#### 3.2 2モジュールでの実験

ここではチューブを制御弁によって流路抵抗の小さい状態から大きい状態に変化させたとき、それぞれのモジュールの体積と位相の時間発展をFig. 4に示す。具体的には、28[s]のときに制御弁を閉めて流路抵抗を大きくした。また、Fig. 5にその際の振動モードのスナップショットを示す。

流路抵抗が小さいときは、二つのモジュールの体積が振動していることから、モジュール間で原形質のやりとりを行っていることが見てとれる。その後流路抵抗を大きくした状況では、モジュールはもう一方と原形質のやりとりができなくなり、当該モジュール内の二つの振動子が反対位相となることで齟齬関数の総和を軽減していることが見てとれる。以上から、流路抵抗を変えることでモジュールの振る舞いに変化したことが確かめられた。

この実機実験で用いたパラメータを下記に示す: $\omega_l = 0.3$  [rad/s];  $\omega_r = 0.305$  [rad/s];  $\sigma = 0.005$  [a.u.];  $\phi_{0,n}(t=0) = 0.0$  [rad] ( $n = l, r$ );  $\phi_{1,n}(t=0) = \pi$  [rad] ( $n = l, r$ ).

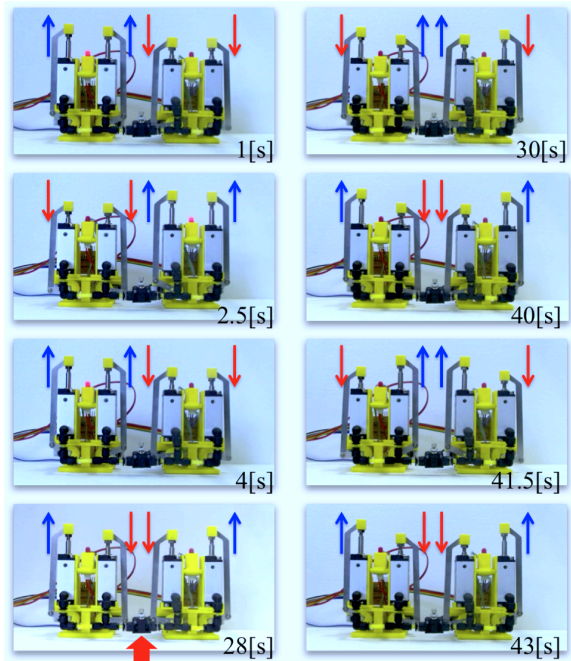


Fig. 5 Snapshots of transition of oscillatory patterns on two modules. At 28 [s], the air regulator is tuned to increase the fluid conductance.

### 3.3 3モジュールでの実験

次に, Fig. 6のように3モジュールを円環状にチューブでつなぎ実験を行った. Fig. 7に示すように, 大きく分けて(a) rotation mode, (b) partial in-phase mode, (c) partial anti-phase mode, (d) intra-oscillation modeの四つのモードが観察された<sup>2</sup>. 各モードの詳細を以下で説明する. (a) rotation modeとは, 隣り合ったモジュールの(体積変化の)位相差が $2\pi/3$ となり振動波が順次伝搬するモードである. (b) partial in-phase modeとは, 二つのモジュールの位相が同位相で振動し, 残り一つのモジュールは反対位相で振動するモードである. (c) partial anti-phase modeとは, 二つのモジュールが反対位相で振動し, 残り一つのモジュールがほとんど振動しないモードである. 最後

<sup>2</sup>四つのモードのうち, (a), (b), (c)のモードの呼称に関しては, 高松らの粘菌振動子に関する論文<sup>2)</sup>を参考にした.

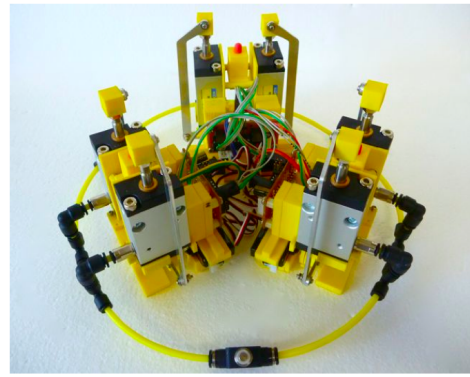


Fig. 6 Schematic of robot composed of three modules.

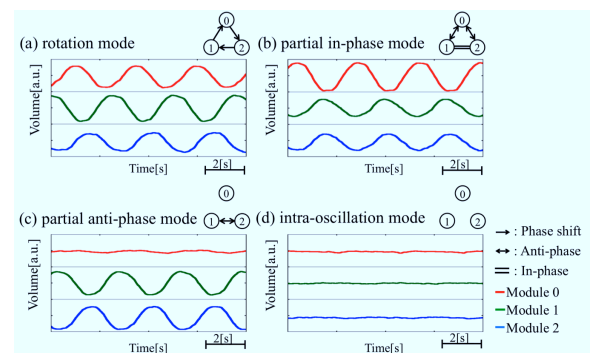


Fig. 7 Oscillatory patterns in three modules. Schematic diagrams of phase relations among three oscillators are indicated at upper right of the plots. Relationships between two modules are indicated by  $\rightarrow$ :  $\frac{2\pi}{3}$  phase shift;  $\leftrightarrow$ : anti phase;  $=$ : in phase.

に(d) intra-oscillation modeとは, すべてのモジュールどうしがほとんど原形質のやりとりをしないモードである. また, Fig. 7のそれぞれの振動モードの右上にある図はモジュールの振動の様子を示したものであり, それぞれの記号は次のように定義した:  $=$ : 同相;  $\rightarrow$ :  $\frac{2\pi}{3}$ の位相差;  $\leftrightarrow$ : 反対位相. 興味深いことは, これらの振動モードのうちの一つにとどまることなく, 複数の振動モード間を自発的に遷移することが確認できたことである (Fig. 8参照).

この実機実験で用いたパラメータを下記に

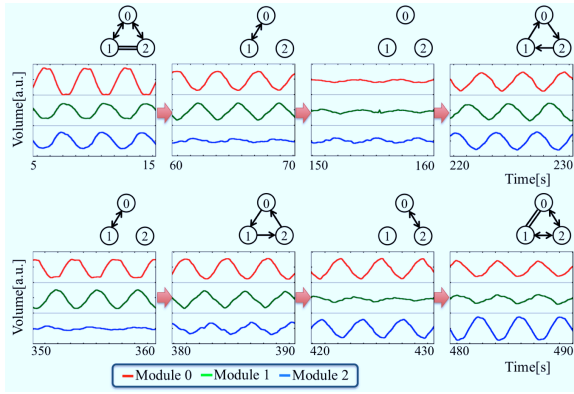


Fig. 8 Transitions between several oscillation modes. ( $\omega_l = 0.3$ ,  $\omega_r = 0.305$ )

示す:  $\omega_l = 0.3$  [rad/s];  $\omega_r = 0.305$  [rad/s];  
 $\sigma = 0.003$  [a.u.];  $\phi_{0,n}(t = 0) = 0.0$  [rad];  
 $\phi_{1,n}(t = 0) = \phi_{2,n}(t = 0) = \pi$  [rad].

### 3.4 ロコモーション実験

次に3モジュール系についてロコモーションさせることを考える. Fig. 9のようにモジュールを中央の質点を介して直線上につなぎ, 計三つのモジュールを円環状に配置する. 実際開発したロボット実機をFig. 10に示す. またロコモーションを生成するために, 本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した接地摩擦制御機構を設計した (Fig. 11参照). 本ロボットの接地のタイミングの制御として, シリンダ内の体積がある値を超えたときに接地するようにした.

まず誘引刺激を与えない場合, ロボットの振る舞いを観察した. ロボットの重心の軌跡をFig. 12に示す. これからロボットがFig. 8のように各振動モード間を遷移することで不規則に動きまわり, 環境を探索していることが見てとれる.

次にFig. 13のように左方向から誘引刺激を与えて実験を行った. 刺激を検知したモジュールは, アクチュエータのバネ定数 $k$ が減少する

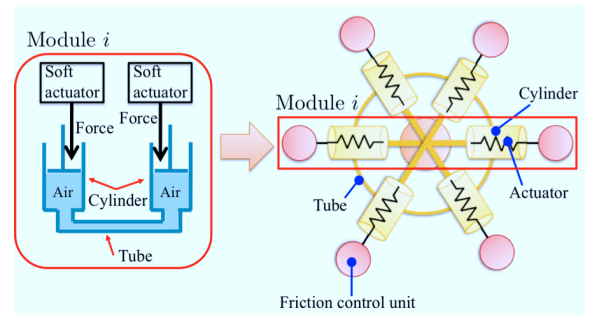


Fig. 9 Basic concept of mobile robot using three modules.

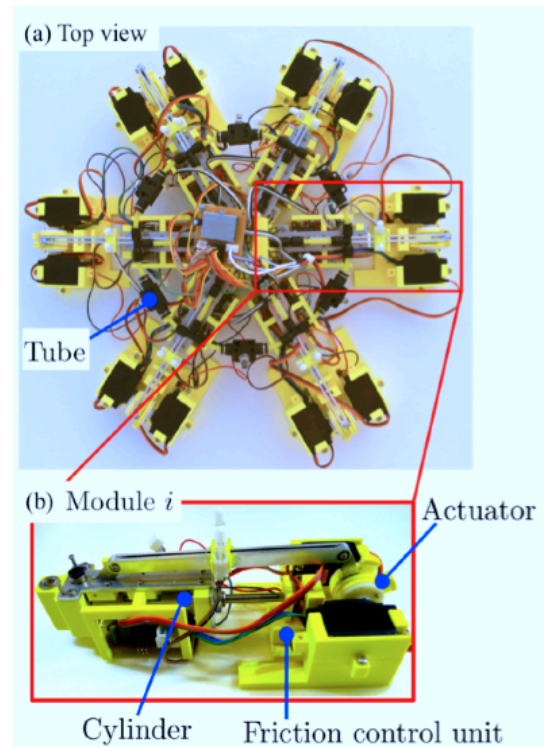


Fig. 10 Schematic of mobile robot composed.

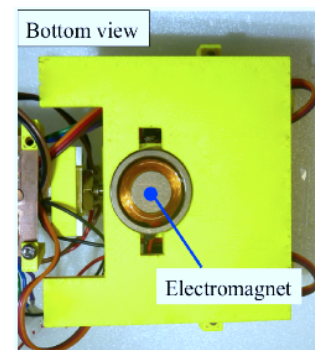


Fig. 11 Friction control unit.

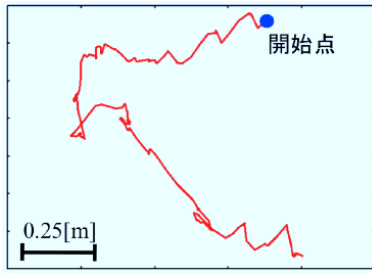


Fig. 12 Trajectory of center of mobile robot without attractant at 0-1730 [s].

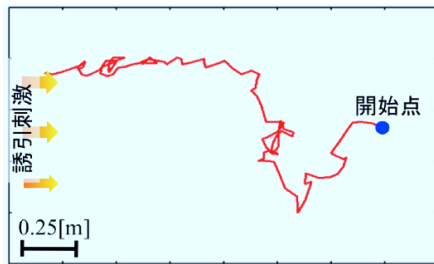


Fig. 13 Trajectory of center of mobile robot with attractant at 0-1160 [s].

よう調整した<sup>6)</sup>。ロボットの重心の軌跡 (Fig. 13) から、誘引刺激の方向に向かって進んでいくことが確かめられた。ロボットは身体の固さを変えることのみで、探索行動から誘引刺激への走性に切り替えたことに注目されたい。

#### 4. まとめと今後の課題

本稿では、原形質量保存則 (保存量の存在) と、力覚情報を活用したリズム調整機能を有したアメーバ様ロボット実機を開発した。実機実験により、ロボットの多様な振動モードとその遷移を観測した。またロボットのロコモーション実験により、明示的な誘引刺激がない場合は周囲を探索し、誘引刺激があるとそちらに向かう、といった質的に異なる振る舞いの発現を制御則の切り替えなしに実現した。今後はFig. 10のロボット実機において、

誘引刺激の有無によって振動モード間の遷移にどのような違いがあるのかを調べるとともに、本稿で確認された振る舞いの背景にある力学系の構造に関して理論的に考察する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は科研費挑戦的萌芽研究 (No. 23656171)、立石科学技術振興財団 (No. 2021005)からの援助を受けた。また、当研究室の加納剛史助教、広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻の小林亮教授ならびに風間俊哉氏には本研究に対して数々の貴重なご助言をいただいた。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) A. Takamatsu, R. Tanaka, H. Yamada, T. Nakagaki, T. Fujii and I. Endo: Spatiotemporal Symmetry in Rings of Coupled Biological Oscillators of Physarum Plasmodial Slime Mold, *Phys. Rev. Lett.*, **87**-7, 078102/078105(2001)
- 2) A. Takamatsu: Spontaneous Switching among Multiple Spatio-temporal Patterns in Three-oscillator Systems Constructed with Oscillatory Cells of Slime Mold, *Physica D*, **223**-2, 180/188(2006)
- 3) S. Yoshiyama, M. Ishigami, A. Nakamura and K. Kohama: Calcium Wave for Cytoplasmic Streaming of Physarum Polycephalum, *Cell Biology International*, **34**-1, 35/40(2009)
- 4) R. Kobayashi, A. Tero and T. Nakagaki: Mathematical Model for Rhythmic Protoplasmic Movement in the True

Slime Mold, *Mathematical Biology*, **53-2**,  
273/286(2006)

- 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*, Springer, **102-3**,  
261/269(2010)
- 6) T. Sato, T. Kano and A. Ishiguro: A  
Snake-like Robot Driven by a Decentral-  
ized Control That Enables Both Phasic  
and Tonic Control, 1881/1886, *Intelligent  
Robots and Systems*(2011)