

流体駆動型アメーバ様ソフトロボットの自律分散制御

Autonomous Decentralized Control of a Fluid-driven Amoeboid Soft Robot

○武田 光一*, 出井 遼*, 梅舘 拓也*,†, 中垣 俊之**,†, 小林 亮***,†, 石黒 章夫*,†

○Koichi Takeda*, Ryo Idei*, Takuya Umedachi*,†, Toshiyuki Nakagaki**,†,
Ryo Kobayashi***,† and Akio Ishiguro*,†

*東北大学, **公立はこだて未来大学, ***広島大学, †JST CREST

*Tohoku University, **Future University-Hakodate, ***Hiroshima University, †JST CREST

キーワード : 流体駆動型ロボット (Fluid-driven robot),
自律分散制御 (Autonomous decentralized control), 齟齬関数 (Discrepancy function),
局所センサフィードバック制御則 (Local sensory feedback control),
可変弾性要素 (Real-time tunable spring)

連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 電気・情報系1号館 512号室
東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 石黒研究室 武田光一,
Tel.:022-795-3207, Fax.:022-795-3781, E-mail: takeda@cmplx.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

生物は非構造的で予測不能的に変動する環境下であっても、実時間かつ合目的的に振る舞う適応的な知を有している。このような知を発現し、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でできるロボットを創り出すためには、ロボットの身体に生物同様の大きな自由度を持たせ、かつそれらを巧みに制御することが必要となる。しかしながら、このような大自由度系を中央集権的に制御するのは困難である。そこで、大自由度系を扱う制御方策として近年着目されているのが自律分散制御である。自律分散制御とは、単純な知覚・判断・行動出力の機能を持つ要素（自律個）が多数集まり相互作用することで、大

域的に有用な機能を創発させる制御方策である。このような特性ゆえに、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い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¹⁾²⁾。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ふ、いわゆるミニマリストック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(Fig. 1)に着目した。真正粘菌変形体は以下の理由から、生物学のみならず、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は持たずとも、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³⁾、完全な自律分散制御則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。

そこで本稿では、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を紹介する。具体的には、原形質として流体を封入し(Fig. 2下図を参照)、力学的な長距離相互作用を生起させる機構を実装する。そして、自然長を実時間かつ能動的に改変可能な弾性要

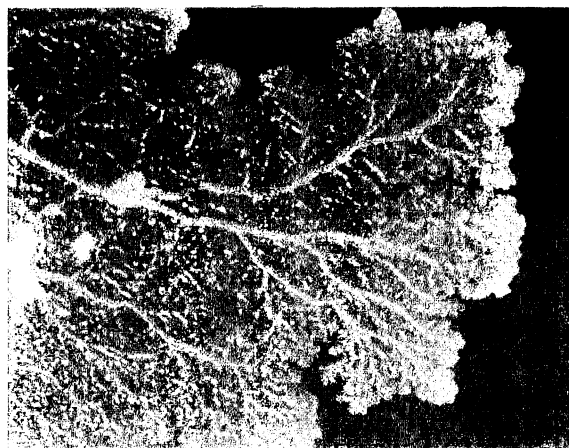


Fig. 1 True slime mold (*Physarum polycephalum*). True slime mold exhibits amoeboid locomotion, which is controlled in a fully decentralized manner.

素(以下、可変弾性要素)を放射状に複数個つなぎ合わせたものを外皮とするアメーバ様ロボットの実機を開発した。その結果、原形質量保存則と身体の柔らかさを活用した局所センサフィードバックにより、安定的にロコモーションを生成することが確認されたので報告する。

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. 2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可変弾性要素(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。この可変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. 2に示す可変

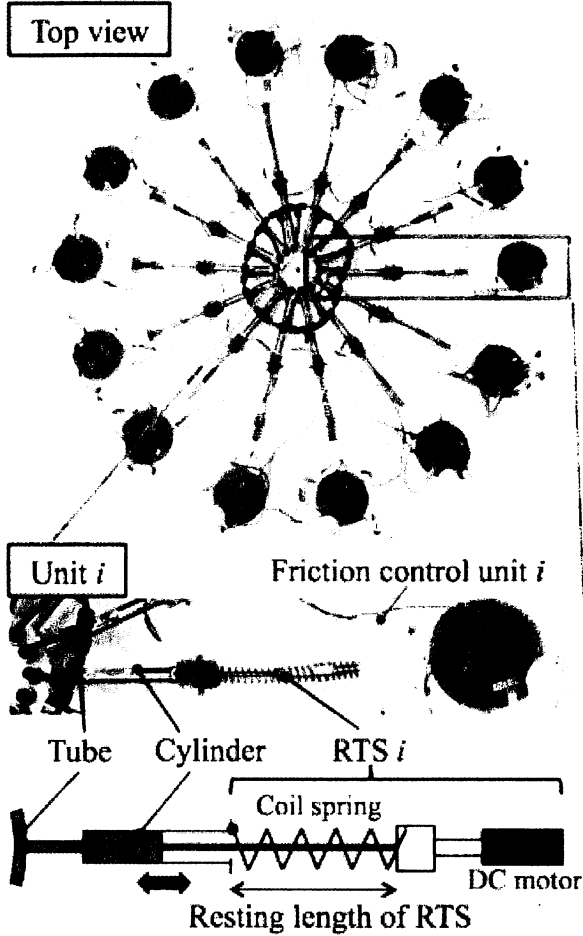


Fig. 2 The real physical robot, Slimy II. The robot consists of the RTSes, the friction control units and the fluidic circuit. The fluidic circuit is made of the cylinders and nylon tubes filled with the fluid (bottom). By changing the resting length of the RTS, the fluid is pushed and pulled with the cylinder rod, which is describes as the red arrow.

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（本稿に記載されている変数・パラメータはTable 1にまとめられているので参照されたい）。下記に機構系の詳細を示す。

Table 1 制御系を議論する上で用いた変数・パラメータの説明

θ_i	ユニット i に実装された振動子の位相
ω	振動子の固有角速度
$f(\theta_{i+1}, \theta_i, \theta_{i-1})$	拡散的相互作用項
$g(l_i, l_i^{RTS}(\theta_i))$	局所センサフィードバック項
k_i^{RTS}	可変弾性要素 i のバネ定数
$l_i^{RTS}(\theta_i)$	可変弾性要素 i の自然長
\bar{l}_i	可変弾性要素 i の自然長変動の平均値
T_i	可変弾性要素 i が発生する張力
I_i	可変弾性要素 i の齟齬関数
a	可変弾性要素の振幅を規定する定数

2.1.1 可変弾性要素

本稿で採用する可変弾性要素(Fig. 3)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。この可変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. 3(a))、送り出したり (Fig. 3(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 は可変弾性要素の平均自然長、 a は可変弾性要素の自然長変動の振幅を規定する定数である。また可変弾性要素 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：

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

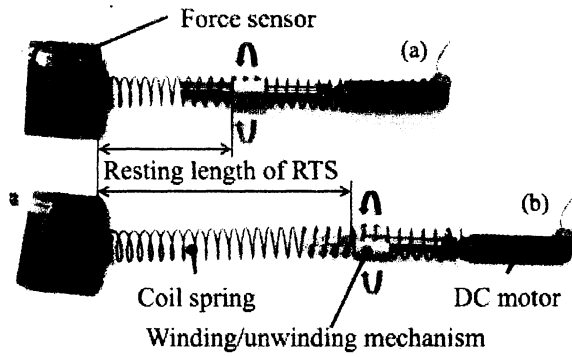


Fig. 3 The RTS can alter its resting length at any time by winding/unwinding the coil spring. (a) Wound state. (b) Unwound state.

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, 可変弾性要素に実装された圧力センサにより, 可変弾性要素に加わる張力 T_i を計測し, 式(3)より間接的に可変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. 4)。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

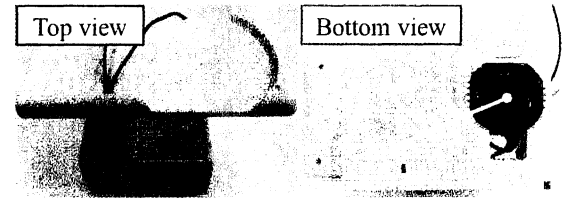


Fig. 4 The friction control unit. The electromagnet is implemented in the bottom of the unit in order to switch between the anchor mode and anchor-free mode.

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, $\Theta, d\Theta$ 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可変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, 適切かつリズム的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⁴⁾⁵⁾:

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

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⁵⁾に基づく局所センサフィードバック項の設計方策を示す。

まず、本アメーバ様ロボットの振る舞い生成において非常に重要である「齟齬関数」を設

計する。この齟齬関数は、可変弾性要素の伸縮サイクルの中で原形質の圧力が高い場合には、振動子の位相を遅らせたり早めたりするものである。これにより、原形質から受ける力が強ければ外皮は無理に収縮しないよう位相調整がなされる。この齟齬関数により、原形質量保存則という物理現実を介して、それぞれのユニットがグローバルに相互作用することが可能になる。

次に、齟齬関数を設計するために、齟齬関数と同様の役割を果たしていると考えられる真正粘菌変形体の細胞学的プロセスを議論する。細胞の変形により Ca^{2+} チャンネルが活性化されるのはよく知られた事実である。この伸ばされることにより活性化する Ca^{2+} チャンネルは、細胞膜の局所的な張力を検知して開閉する。そして、高濃度の Ca^{2+} はアクトミオシン収縮の緩和を引き起こすため⁶⁾、この種のチャンネルはリズムミクな収縮を弛緩させることとなる。つまり、原形質からの圧力が高ければ、外皮はたとえ収縮しようとしても弛緩することとなる。以上が、齟齬関数の役割を果たしていると考えられる細胞学的プロセスである。

上記の生物学的な知見に基づき、齟齬関数を以下のように設計した:

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

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、可変弾性要素の自然長 $l_i^{RTS}(\theta_i)$ と実際の長さ l_i の間の齟齬である T_i (式(3)) の2乗により記述するものとした。 T_i は各ユニットが局所的に入手可能な値であることに注目されたい。この T_i は、能動性と受動性を兼ね備えた可変弾性要素の機械的性質のために抽出可能な値である。また可変弾性要素の実際の長さ l_i は、自然長 $l_i^{RTS}(\theta_i)$

以外にも、ほかのユニット、原形質、外部環境から受ける力が反映されたものであり、この齟齬関数は制御系・機構系・環境間の齟齬を縮約したものだと言える。

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⁵⁾：

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

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統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じられて走性を示すようにSymmetry-breakingメカニズムを導入する(Fig. 5)：

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

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。

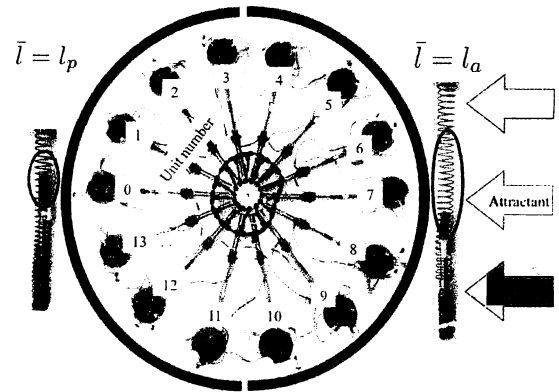


Fig. 5 Implementation of the symmetry-breaking mechanism.

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：

初期設定: ユニット数 = 14; 初期位相 $\theta_i = \pi/2$ [rad].

パラメータ: $l_a = 90$ [mm]; $l_p = 55$ [mm]; $a = 0.5$;

$$\omega = 0.45 \text{ [rad/sec]}; \Theta = 3\pi/2 \text{ [rad]}; d\Theta = \pi/2 \text{ [rad]}.$$

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. 6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. 5のユニット番号0から13までのすべてのユニットの位相データの時間発展をFig. 7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流体駆動型アメーバ様ソフトロボットの実機を開発し、制御系と機構系の連関様式に関する体系的な考察を行った。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実世界で確認した。本稿で提案した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⁷⁾⁸⁾、別の形態にも適応可能であると考えられる。今回得られた結果は、自律分散制御則の設計に関して有用な知見を与えると筆者らは考える。今後の課題として、狭窄空間突入実験を行い本アメーバ様ロボットが持つ適応性に関する検証を行いたいと考えている。

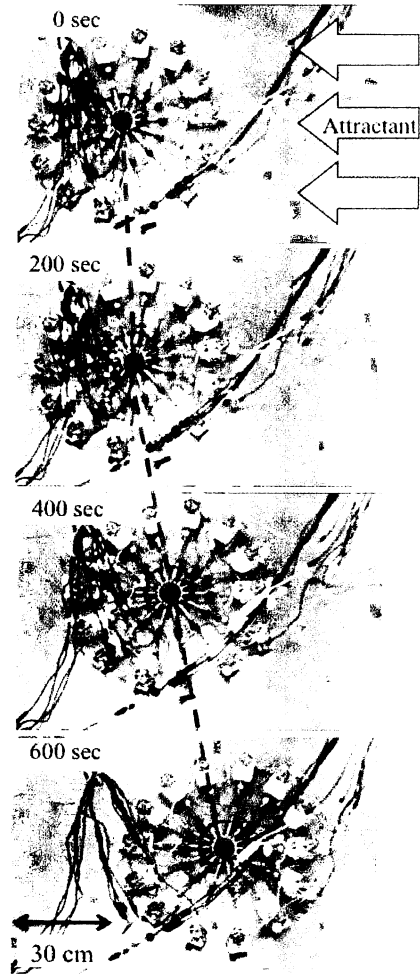


Fig. 6 Locomotion experiment of Slimy II. The red dot-line describes the trajectory of the center over time (see from top to bottom in each figure).

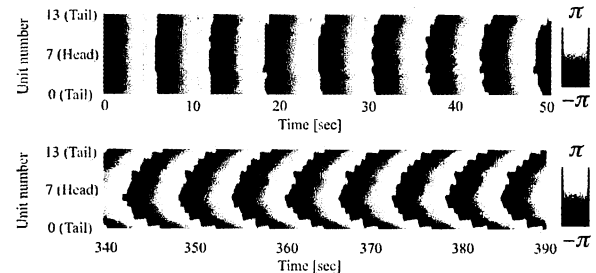


Fig. 7 The spatio-temporal pattern of phase of the oscillators.

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。

参考文献

- 1) G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu. "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators", *Biol. Cybern.*, vol. 65, pp.147-159, 1991.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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", *Biol. Cybern.*, vol 102, pp.261-269, 2010.
- 6) S. Yoshiyama, M. Ishigami, A. Nakamura, K. Kohama: Calcium wave for cytoplasmic streaming of *Physarum polycephalum*, *Cell Biology International*. doi:10.1042/CBI20090158 (2009)
- 7) 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.
- 8) 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.