

# 真正粘菌変形体から抽出した自律分散制御則の 適用可能性の検証 -ヘビ型ロボット実機による事例研究-

## Verification of the Applicability of the Decentralized Control Mechanism Extracted from True Slime Mold -A Robotic Case Study with a Serpentine Robot-

○佐藤 貴英\*, 加納 剛史\*, 石黒 章夫\*,\*\*

○Takahide Sato\*, Takeshi Kano\* and Akio Ishiguro\*,\*\*

\*東北大学, \*\*JST CREST

\*Tohoku University, \*\*JST CREST

**キーワード:** 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),  
二次元ヘビ型ロボット (2D serpentine robot)

**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 佐藤貴英,  
Tel.:022-795-3207, Fax.:022-795-3781, E-mail: tsato@cplx.ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

生物はたとえ原始的な種と分類されるものであっても、ダイナミックに変動する環境下において、しなやかに動き回り、驚くほど適応的な振る舞いを示す。このような振る舞いは、身体に有する膨大な自由度を巧みに操ることで初めて可能となる。したがって、あたかも生物のごと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、かつそれら自由度を巧みに制御することが必要となる。そこで、大自由度系を扱う制御方策として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大自由度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。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」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。この問題を解決するためには、(1) 自律個のダイナミク

ス、(2) 自律個間の相互作用様式、そして(3) 制御系（自律個集団）と機構系（身体）の連関様式、に対して明確な設計指針を与えることが必要である。上記(1)と(2)に関しては、結合振動子系を用いた運動制御などの既存研究において議論されているものの<sup>1)-5)</sup>、(3)に関しては事例ごとにテラーメイドかつアドホックに設計されてきた。それゆえ、たとえロボットが適応的な振る舞いを示したとしても、自律分散制御における個と全体つなぐロジックに関する体系的な知見を与えることが困難であった。この事実を踏まえ、特に(3)に関する体系的な考察は喫緊の課題であるといえる。

この問題に取り組むため筆者らは、中枢が存在せず、純粋な自律分散制御がなされている真正粘菌変形体のアメーバ様ロコモーションに着目し、その発現原理の解明に取り組んできた<sup>6)7)</sup>。真正粘菌変形体の身体においては原形質量保存則が成立しており、それゆえ、自律個間に大域的相互作用の存在が保障されている。このような個と全体をつなぐロジックの核があらかじめその身体に内在されているため、自律分散制御における制御系と機構系の連関様式を集中して考察するのに最も適したモデル生物であるといえる。あえて原始的な真正粘菌変形体まで立ち戻って考察するアプローチにより、筆者らは、制御系・機構系・環境間の齟齬を抽出する齟齬関数（discrepancy function）に基づく、制御系と機構系の連関様式に関する設計スキームを得た。ここで疑問となるのは、アメーバ様ロコモーションから得た上記の制御メカニズムが、多様な生物ロコモーションに通底するメカニズムとなりえるかどうか、である。したがって、この制御メカニズムの普遍性に言及するためには、真正粘菌変形体とは異なる身体における妥当性を検証する必要がある。

そこで本研究では、進化的にアメーバ様ロコモーションの後進にあたるヘビの這行様ロコモーションを事例として採り上げる。その理由は、i) ヘビの身体構造は他の哺乳動物などの高等生物と比べ身体構造が単純であるためモデル化する上で扱いやすいこと、ii) 環境適応的なダイナミクスを有していることから、そこには自律分散制御における制御系と機構系の連関様式に関する合理的かつ普遍的な規則が潜んでいると期待できること、が挙げられる。本研究は初動段階であることから、ヘビの示す多様なロコモーション様式の中で最も基本的なロコモーションである蛇行運動に着目し、その自律分散制御則を齟齬関数に基づき設計する。実機を用いた検証実験の結果、接地摩擦変動に対する実時間適応性、ならびに振動子間相互作用の局所的な故障に対する耐故障性が確認されたので、本稿ではその詳細を報告する。

## 2. 提案手法

### 2.1 機構系

設計するロボットの構造をFig. 1に示す。ロボットは複数の等質な体節が関節を介して一次元的に連結した構造を有しており、各関節にはモータと弾性要素として機能するねじりバネが実装されている。また、効果的に推進力を生成させるため、身体と接地面との摩擦係数を、体軸方向に比べ体軸に対し垂直な方向において大きいとした（Fig. 1）。自然界におけるヘビも、このような摩擦力の異方性を活用しロコモーションを実現していることが知られている<sup>8)</sup>。

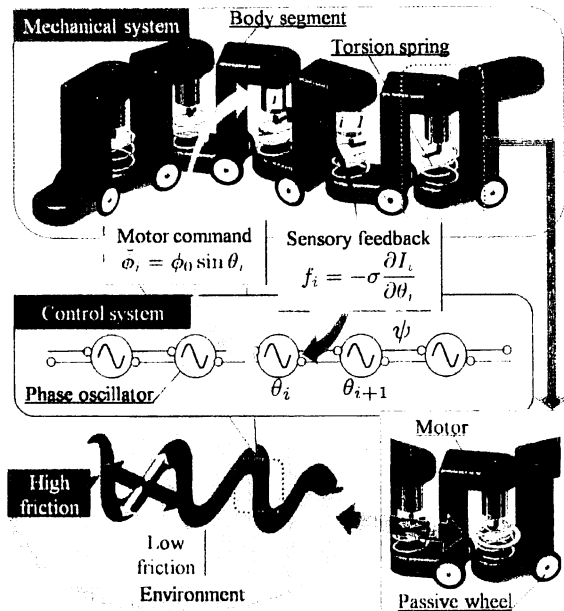


Fig. 1 Schematic of body and control system of two-dimensional serpentine robot.

## 2.2 制御系

蛇行運動を生み出すため、制御系には結合振動子系を導入する。各モータには位相振動子が実装されており、 $i$ 番目の位相 $\theta_i$ の時間発展は次式で記述される：

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega + \varepsilon[\sin(\theta_{i+1} - \theta_i + \psi) + \sin(\theta_{i-1} - \theta_i - \psi)] + f_i, \quad (1)$$

ここで、 $\omega$ は振動子の固有周波数、 $\varepsilon$ は正の定数である。右辺第2項は隣接振動子間の結合関数であり、位相差が $\psi$ に引き込まれるよう設計した。 $f_i$ は機構系からの局所センサフィードバック項であり次節で詳細に述べる。対応する振動子の位相 $\theta_i$ に応じて、 $i$ 番目のモータの目標角度 $\bar{\phi}_i$ が決定される：

$$\bar{\phi}_i = \phi_0 \sin \theta_i, \quad (2)$$

ここで、 $\phi_0$ は蛇行の振幅を規定する正の定数である。

## 2.3 制御系と機構系の連関

本研究における制御系と機構系の連関の様子をFig. 1に示す。ロボットの各関節は、Eq. (2)で表わされる振動子からの制御指令により駆動される。しかしながら、環境とロボットとの相互作用により、ロボットの振る舞いは完全には制御指令に従わず、結果として、実際の関節角度 $\phi_i$ は $\bar{\phi}_i$ から逸れる。この齟齬を特徴付けるため、齟齬関数 $I_i$ を下記のように定義する：

$$I_i = (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2. \quad (3)$$

$I_i$ は局所情報のみから計算される点に注意されたい。 $I_i$ を用いて、本研究では局所センサフィードバック項 $f_i$ を下記のように定めた：

$$f_i = -\sigma \frac{\partial I_i}{\partial \theta_i}, \quad (4)$$

ここで、 $\sigma$ は正の定数である。上記の局所センサフィードバックの設計方策が、真正粘菌変形体の観察から得た方策である<sup>6),7)</sup>。

本モデルにおいて、ロボットの関節に弾性要素が意図的に導入されている点に注意されたい。弾性要素は進行中のロボットの振る舞いに呼応した変形を示すため、制御系-機構系間で生成される齟齬情報は、ロボットと環境との相互作用に関する重要な情報含んでいると考えられる。したがって、齟齬をセンサ情報として活用することで、いまだ概念的理解に留まっていた“active perception”や“sensory-motor coordination”<sup>9)</sup>が実現可能である。

## 3. ロボット

### 3.1 実機開発

Fig. 2aに、開発した2次元ヘビ型ロボット HAUBOT (Hyper-redundant Adaptive Undulatory roBOTic system)の全体像を示す。ロボ

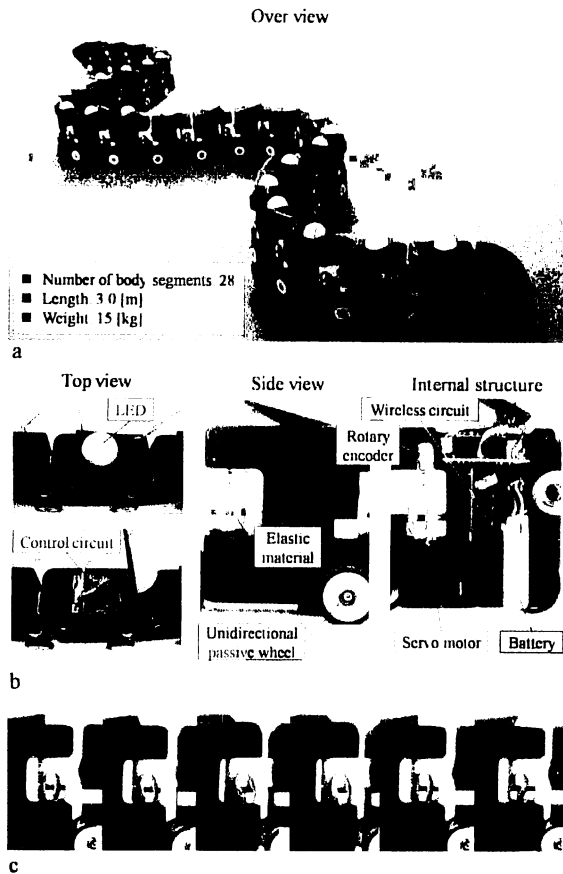


Fig. 2 Real physical serpentine robot developed. a Over view of the entire structure, b detailed structure of body segment, and c elastic material implemented into each joint.

ットは28体節で構成されており、全長、質量はそれぞれ、3.0 (m)、15 (kg)である。各体節には接地摩擦の異方性を生み出すための、一方向性の受動車輪が実装されている。Fig. 2bに体節の詳細な構造を示す。各体節には、簡単なマイクロコンピュータを実装した制御回路基板、位相、齟齬などの内部データを取得するための無線通信用回路基板、関節角度検出用のロータリエンコーダ、電源バッテリー、そして、関節駆動用のサーボモータが内蔵されている。また、体節上部には内部位相視認用のLEDが実装されており、LEDは $\sin \theta_i \geq 0$ の時に赤く点灯する。

本ロボットにおいて、キーとなるEq. (4)の

機構系への導入方策について述べる。Fig. 2cに示すように、各関節には弾性要素が実装されており、各体節のモータを自身の駆動対象である隣接体節と「直接」結合するのではなく、弾性要素を介して「間接的」に結合する。これにより、振動子出力（制御系）によって規定されるモータの目標回転角度 $\bar{\phi}_i$ と実際の関節角度 $\phi_i$ （機構系）との間にずれ（齟齬）が生じることが許される。このように本研究では、局所において制御指令とロボットの動作との間に齟齬を生み出すため、制御指令に対し能動的に振る舞う active な要素のみならず、受動的に振る舞う passive な要素（弾性要素の elasticity）を積極的に活用している点に注意されたい。

## 4. 実験結果

本章では、実機を用いた検証実験の結果について述べる。具体的には、環境変化に対する適応性、ならびに振動子間結合関数の局所的な故障に対する耐故障性観点からロボットの振る舞いを計測する。以下に実験設定を示す：

初期状態:  $\theta_i = \phi_i = 0$  for all  $i$ .

パラメータ:  $\omega = 1.0$  ( $s^{-1}$ );  $\phi_0 = 0.60$ ;  
 $\varepsilon = 0.18$  ( $s^{-1}$ );  $\psi = 0.36$ ;  $\sigma = 1.0 \times 10^{-3}$  ( $kg^{-2}m^{-4}s^{-5}$ ).

### 4.1 環境変化に対する適応性

環境変化に対する適応性を検証するため、異なる接地摩擦面、ならびに狭窄空間におけるロボットのロコモーションを計測した。

#### 4.1.1 接地摩擦変化

Fig. 3にロボットが低摩擦面から、高摩擦面へと移動する際の振る舞いの様子を示す。フ

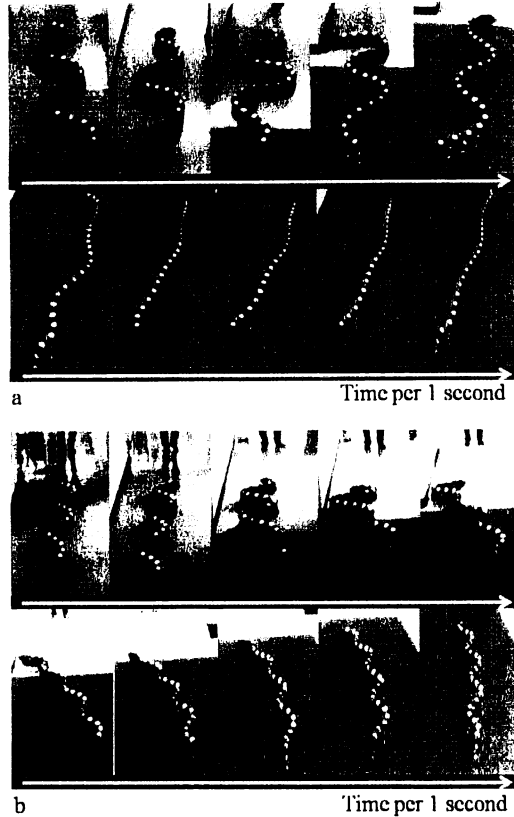


Fig. 3 Snapshots when the robot goes into high frictional terrain: **a** without the local sensory feedback and **b** with the local sensory feedback. The frictional coefficient of the green surface is larger than that of the white surface.

フィードバックが無い場合には、ロボットは摩擦変化に対応できず、ロコモーションを継続することができなかった(Fig. 3a). 一方、フィードバックがある場合には、ロボットは効果的に身体に含む波数を増加させ、かつ身体の振幅を減少させることで高摩擦面においてもロコモーションを継続することができた(Fig. 3b).

Fig. 4に各自律個で生じた齟齬の総和 $\sum_i I_i$ , ならびに各振動子位相の時空パターンを示す. フィードバックが無い場合には、ロボットが高摩擦面へ移動すると $\sum_i I_i$ は著しく増加した(Fig. 4a). 一方、フィードバックがある場合には、振動子間の位相関係が調整されることで、 $\sum_i I_i$ は減少した(Fig. 4b). したがって、局所センサフィードバックが接地摩擦変化に対し

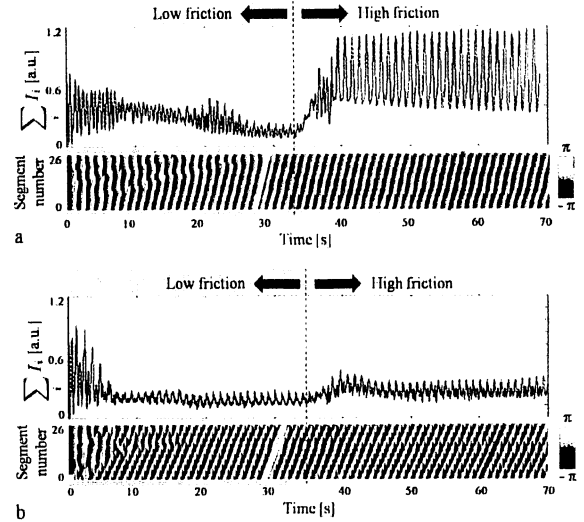


Fig. 4 Time evolution of the total amount of discrepancy  $\sum_i I_i$  (top) and the phases of oscillators (bottom) when the robot goes into high frictional terrain: **a** without the local sensory feedback and **b** with the local sensory feedback. Orange and red lines in the bottom graph illustrate the phase gradient from the head to tail.

て重要な役割を果たすことが確認された.

#### 4.1.2 狭窄空間

Fig. 5にロボットが狭窄空間に侵入する際の振る舞いの様子を示す. フィードバックが無い場合には、ロボットは狭窄空間を通り抜けることができなかった(Fig. 5a). 一方、フィードバックがある場合には、ロボットは自発的に身体に含む波数を変化させることで見事に狭窄空間を通過することができた(Fig. 5b).

Fig. 6に各自律個で生じた齟齬の総和 $\sum_i I_i$ , ならびに各振動子位相の時空パターンを示す. フィードバックが無い場合(Fig. 6a)と比較して、狭窄空間中であっても局所センサフィードバックの効果により位相勾配を大きくし、 $\sum_i I_i$ の増加を抑えていることを確認した(Fig. 6b).

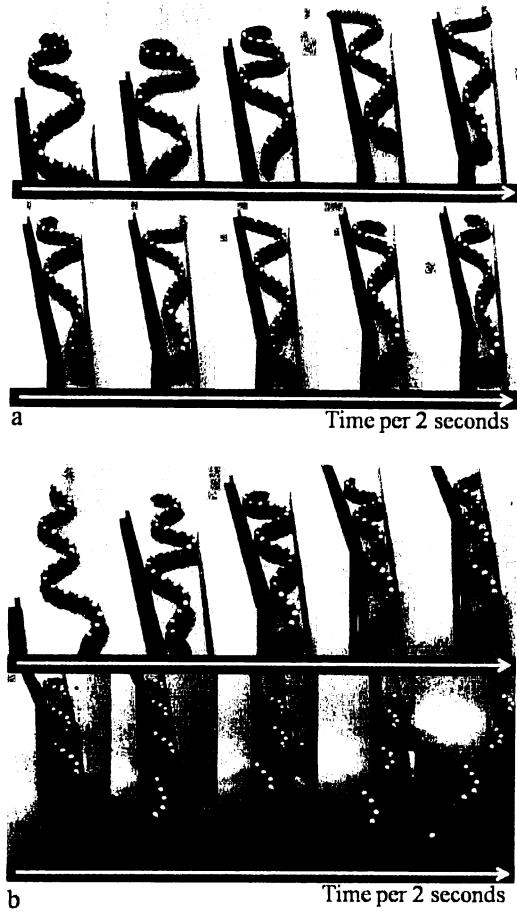


Fig. 5 Snapshots of the robot when the robot goes into narrow aisle: **a** without the local sensory feedback and **b** with the local sensory feedback. Width of gate to a narrow aisle is 450 [mm] and an exit is 200 [mm].

#### 4.2 結合関数の局所的な故障に対する耐故障性

故障に対する頑健性を検証するため、局所的に振動子間結合関数が失われた場合のロボットのロコモーションを計測した。得られた結果をFig. 7, Fig. 8に示す。フィードバックが無い場合には、ロボットは故障により、進行波を生成することができず、ロコモーションすることができなかった(Fig. 7a, Fig. 8a)。一方、フィードバックがある場合には、数周期後に頭部から尾部にかけての位相勾配が生成され、

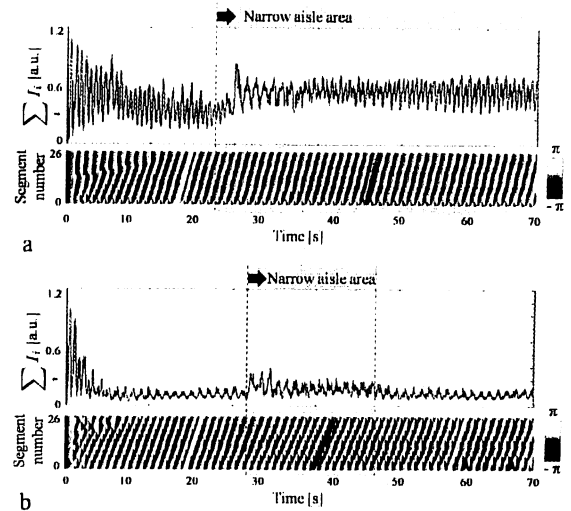


Fig. 6 Time evolution of the total amount of discrepancy  $\sum_i I_i$  (top) and the phases of oscillators (bottom) when the robot goes into narrow aisle: **a** without the local sensory feedback and **b** with the local sensory feedback. Orange and red lines in the bottom graph illustrate the phase gradient from the head to tail.

故障が無い場合とほぼ同等のロコモーションが見られた(Fig. 7b, Fig. 8b)。したがって、提案する局所センサフィードバックを導入することで、ロボットは高度な耐故障性を示すことが確認された。

## 5. まとめと今後の展望

本稿では、生物の示す多様なロコモーション様式に通底する制御のからくりを解明することを目指し、大自由度系の制御方策として自律分散制御に着目した。そして、これまでの筆者らの真正粘菌変形体に関する事例研究から得た、齟齬関数に基づく自律分散制御方策をヘビ型ロボットへ適用し、その妥当性を検証した。実機を用いた検証実験の結果、環境変化に対する実時間適応性、ならびに局所的な故障に対する耐故障性が著しく向上することが確認された。

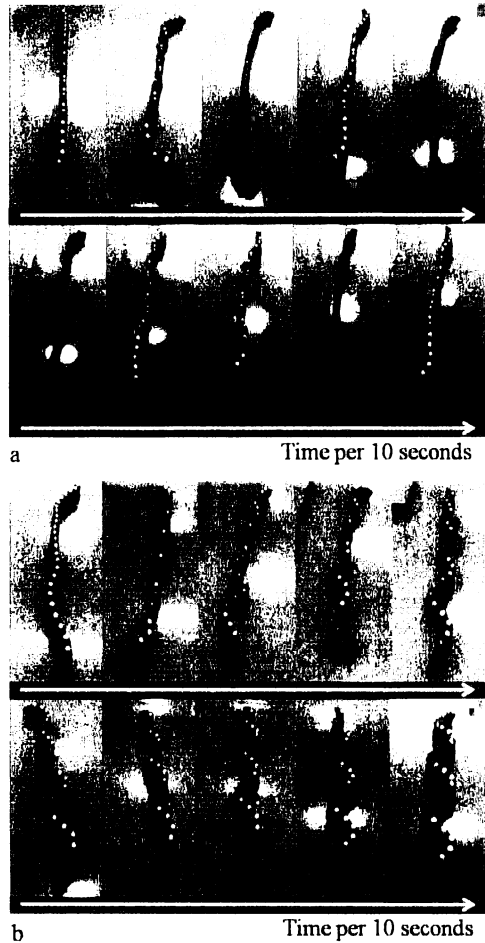


Fig. 7 Snapshots of the robot: **a** without the local sensory feedback and **b** with the local sensory feedback. The robot locomotes on a flat terrain under the malfunction condition.

本稿で明らかにした位相制御による環境適応方策に加え、筋緊張の空間分布がもたらす環境適応的なダイナミクスを新たに導入することで、より環境適応的なロコモーションを生み出せると考える。したがって、今後は位相制御と筋緊張制御の双方を考慮したヘビ型ロボット実機の開発を試みる。

## 謝辞

広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻の小林亮教授、ならびにはこだて未来大学複雑系知能学科の中垣俊之教授からは、本

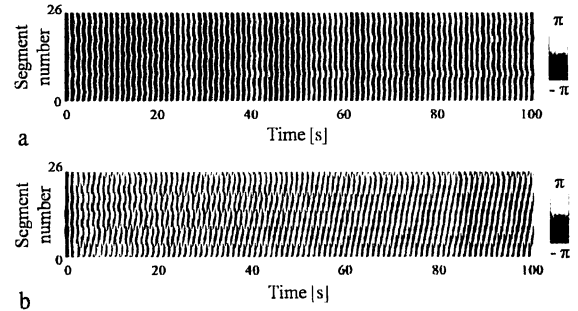


Fig. 8 Time evolution of the spatio-temporal pattern of phases of the oscillators: **a** without the local sensory feedback and **b** with the local sensory feedback under the malfunction condition.

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) H. Kimura, Y. Fukuoka and H. Nakamura, "Biologically inspired adaptive dynamic walking of the quadruped on irregular terrain", in *Proc. of ISRR99*, pp. 271-278, 1999.
- 2) H. Kimura, S. Akiyama and K. Sakurama, Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator, *Autonomous Robots*, vol. 7, no. 3, pp. 247-258, 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) G. Taga, Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuro-musculoskeletal system and the environment, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 75, no. 1-3, pp. 190-208, 1994.
- 5) G. Taga, A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion - II. Real-time adaptability under various constraints, *Biol. Cybern.*, vol. 73, pp. 97-111, 1995.
- 6) R. Kobayashi, A. Tero and T. Nakagaki, Mathematical model for rhythmic protoplasmic movement in the true slime mold, *L. Math. Biol.*, 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) 広瀬茂男, "生物機械工学", 工業調査会, 1987.
- 9) R. Pfeifer and C. Scheier, "Understanding Intelligence", MIT Press, 1999.