

## 粘菌型ロボットから探る 自律個間の相互作用様式のあり方に関する考察

加藤 拓真\*, 清水 正宏\*, Max Lungarella\*\*, 石黒 章夫\*

Takuma Kato\*, Masahiro Shimizu\*, Max Lungarella\*\*, and Akio Ishiguro\*

\*東北大学, \*\*チューリッヒ大学

\*Tohoku University, \*\*University of Zurich

キーワード: モジュラーロボット(Modular robot), 不均質性(Heterogeneity),  
複雑ネットワーク(Complex networks)

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 加藤拓真,  
Tel.:022-795-3207, Fax.:022-795-3781, E-mail: kato@cmplx.ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

生物は、粘菌のような神経系すら有さないプリミティブな種であっても、自身の身体を持つ膨大な自由度を適切に制御することで非構造的かつ予測不能的に変動する環境下で実時間適応的に対処している<sup>1)</sup>。しかしながら、従来のロボットの多くが採用している中央集権的な制御では、大自由度系を扱うことが困難である。そこでロボティクスの分野では、大自由度系を扱う方策として自律分散制御が注目されている。自律分散制御では、複数の自律個から構成されるシステムを扱うため、システムに協調的かつ合目的な振る舞いを生成させるためには、構成要素間の相互作用を効果的に活用することが重要である。

自律個間の相互作用には大きく分けて二つの相互作用様式が挙げられる。生物における

化学物質の拡散や神経系を介した情報伝達に相当する情報の相互作用(informational interaction)と、自律個の身体性に基づく物理的相互作用(physical interaction)である。したがって、協調的かつ状況依存的に振る舞う自律分散システムを設計するためには、これら情報の相互作用と物理的相互作用をどのように関連させるかが重要となる。しかしながら従来の研究では、情報の相互作用をどのように設計するかに重点がおかれており、物理的相互作用を積極的に活用するような設計は行われていない。

そこで本研究では、筆者らがこれまでに開発を進めてきた粘菌型モジュラーロボット(Slimebot<sup>2)</sup>)を事例として、情報の相互作用と物理的相互作用の間のあるべき関連様式を考察することを目的とする。モジュラーロボットとは、物理的に結合させた複数の機械モジュール

の相対位置関係を改変することにより形態変形と移動を可能にするロボットシステムである<sup>3)4)5)6)</sup>。本研究の粘菌型モジュラーロボットSlimebotは多数の機械モジュール群から構成され、それらが動的に着脱することにより、連続体的な粘菌の振る舞いをモデル化する自律分散システムである。このロボットの粘菌様アメーバロコモーションは、結合振動子系の相互引き込み現象（情報の相互作用）と自発的かつ受動的なモジュール間結合（物理的相互作用）を素過程とした、機構系と制御系の相互作用ダイナミクスから創発する。ここで重要となるのは、Slimebotにおける情報の相互作用が、結合している最近接のモジュールとのみ行われる拡散的相互作用に限定されていることである。したがって、Slimebotが適応的に振る舞うためには、物理的相互作用に相当するモジュール間の着脱を通して行われる形態制御を効果的に行う必要がある。これまでの研究から、Slimebotの振る舞いはモジュール間の着脱特性に大きく影響されるという結果が得られており、着脱特性に不均質性を導入する（物理的相互作用を変化させる）と、均質な着脱特性のみの場合より適応能力が向上することがわかっている<sup>7)</sup>。したがって、着脱特性が均質な場合と不均質な場合における形態制御の違いと適応能力の違いについて検証することで、情報の相互作用と物理的相互作用の関連様式のあり方を考察することができると考えられる。

このために本研究では、各モジュールをノード、モジュール間の結合をリンクとすることでSlimebotをネットワークとみなし、複雑ネットワークに基づく解析手法を導入する。具体的には、結合振動子系の同期化現象の解析に使われるラブラシアン行列<sup>8)</sup>を時間に対して拡張し、その固有値解析により情報の相互作用

と物理的相互作用の関連様式のあり方を議論する。シミュレーションの結果、均質な着脱特性を有する場合と不均質な着脱特性を有する場合とでネットワーク構造に特徴的な違いが観測されたので報告する。シミュレーションの結果、物理的相互作用を変化させることでSlimebotのネットワーク構造に興味深い特徴が確認されたので報告する。

## 2. 粘菌型ロボット：Slimebot

以下に、本研究で用いるSlimebotの機構系・制御系について説明する。

### 2.1 機構系

各モジュールはFig.1に示すような機構系を持ち、モジュール間の結合は機能性素材（無極性ベルクロテープ）を介して行われる。これは接触すると互いが容易に結合し、そして剥離強さ以上の力がかかると自動的に離れるという興味深い特性を有している。この特性を活用することで、環境依存的なモジュラーロボットの自発的かつ受動的な形態変形が期待される。ここで、結合したモジュール間においては局所的な通信が可能であると仮定している。また、各モジュールは、伸縮可能な複数の腕と地面との接地摩擦の大小を制御可能な機構

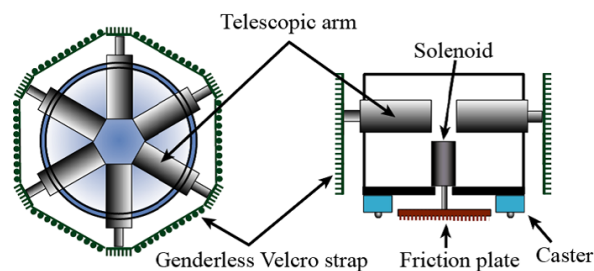


Fig. 1 : Mechanical structure of each module. (Left) top view. (Right) side view.

を有している．各モジュールの運動機能は，腕の伸縮と接地摩擦を活用することにより生成される．したがって，各モジュールは自走機能を有さず，複数のモジュールが協調してはじめてモジュールの移動が可能となる．さらに，誘引刺激を検知するセンサも併せて有しているものとした．

## 2.2 制御系

ここでは，Slimebotモジュール (Fig.1参照) を複数集めてモジュラーロボットを構成した場合に，群としてのコヒーレンシーを維持しながら合目的的に形態を改変可能な制御方を考える．この目的のために，本研究では各モジュールに非線形振動子であるVDP(van del Pol)振動子の実装を行う．これら振動子間の相互引き込みを通して，各モジュールが有する腕の伸縮および接地摩擦制御のタイミングの整合を図る．以下，その制御方を説明する．

各モジュールの実装しているVDP振動子は次式で表される：

$$\alpha_i \ddot{x}_i - \beta_i (1 - x_i^2) \dot{x}_i + x_i = 0, \quad (1)$$

ここで， $\alpha_i$ は振動数を，そして $\beta_i$ は非線形振動のリミットサイクルに収束する速度をそれぞれ規定するパラメータである．各モジュールはVDP振動子の位相に基づき，自身が移動する「Activeモード」と，自身は移動しない「Passiveモード」と呼ばれる2つの動作モードを交互に繰り返す．Activeモードでは，各モジュールは結合している腕の伸縮を行うと同時に，接地摩擦を低くすることで，群内における移動を生成する．一方，Passiveモードでは，各モジュールは腕を自然長に保つと同時に，接地摩擦を高くすることで，Activeモー

ドにあるモジュール群が効率よく進むための支点として機能する．ここで，各モジュールが誘引刺激を検出した場合は高い振動数，外縁部である場合は低い振動数となるようなセンサフィードバックを導入する．そして，物理的に結合したモジュールのVDP振動子間において次式で表わされるような相互作用を導入する：

$$x_i = x_i^{\text{tmp}} + \varepsilon \left\{ \frac{1}{N_i(t)} \sum_{j=1}^{N_i(t)} x_j^{\text{tmp}} - x_i^{\text{tmp}} \right\}, \quad (2)$$

ここで， $x_i^{\text{tmp}}$ は相互作用前のモジュールの振動状態を表し， $x_i$ は相互作用によって更新された状態を表す．また $N_i(t)$ は時刻 $t$ においてモジュール $i$ に隣接するモジュールの数を表し， $\varepsilon$ は相互作用の強さを表している．このような拡散的相互作用を行うことにより，動作モード切替のタイミングが，誘引刺激を検出したモジュールから全体へ進行波として伝搬する．この際，各モジュールのActiveモードにおける腕の伸縮に必要な力を，最近接モジュールとの位相差に比例するように与える．この結果，モジュールは位相勾配方向に移動する．以上のようなモジュールの群の動きによって，Slimebotは形態を維持しようとする表面張力的な凝集力を伴った環境適応的ロコモーションを発現する．

## 3. Slimebotの発現する環境適応機能

Slimebotは機構系における機能性素材の力学的特性と制御系における非線形振動子の相互引き込み現象の相互作用により環境適応的ロコモーションを創発することがシミュレーション実験と実機実験両方において確認されている (Fig.2) ．

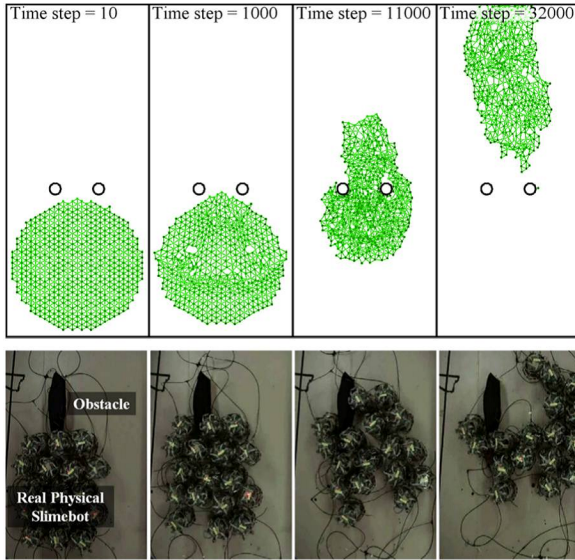


Fig. 2 : Top: Simulation result. Bottom: Experimental result.

このことから，Slimebotの環境適応性はモジュール群における非線形振動子間の相互引き込みと機能性素材による状況依存的な自発的着脱機構に大きく影響されることがわかる。ここで，これまでの研究において，モジュール間の接着強度がSlimebotの環境適応性に与える影響についての知見が得られているので紹介する。シミュレーション条件は，Fig.3に示すように，モジュール数：250，初期形状は円盤形状，円筒状障害物4つとし，誘引刺激を紙面上方から照射した。環境適応性の評価は

- 1) 迅速に目標地点にたどり着く。
- 2) 形態のコヒーレンシーの維持度が高い。

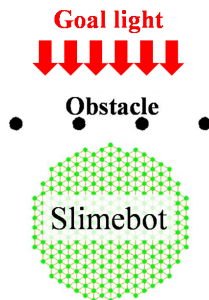


Fig. 3 : Simulated environment.

という二つの要請を同時に満たす場合に高い評価値をあたえるように設定した。これらはそれぞれ次のように表わされる：

$$e_v = v_g - v_0 \quad (3)$$

$$e_c = \begin{cases} -c + c_0 & (c \leq c_0) \\ 0 & (c > c_0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで， $v_g$ は目標地点への到達時間から導かれる重心速度， $c$ はある時刻 $t$ において分離している群(クラスター)の数である。 $v_0$ と $c_0$ はそれぞれ評価の基準を定める定数である。そして，これら目標地点への到達度 $e_v$ と，コヒーレンシーの維持度 $e_c$ の積を取ることによって，1，2の要請を同時に満たす場合に高い値を示す評価関数Evalを，次式の通り定義する：

$$\text{Eval} = a_v e_v \cdot a_c e_c \quad (5)$$

$a_v$ ， $a_c$ は1，2それぞれの正規化定数を表している。

得られた結果をFig. 4に示す。この結果はモジュール群の初速ベクトルを変化させた10回試行の平均を採用している。横軸，縦軸共に接着強度を示し，それぞれの接着強度の組み合わせによる評価値が，その交点に示されている。従って，対角上の領域は均質な着脱特

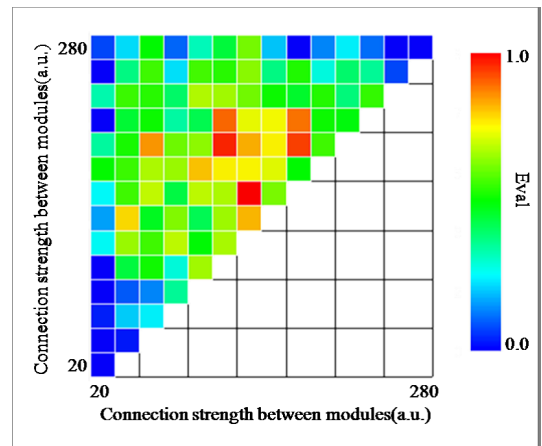


Fig. 4 : Evaluation of the performance under the heterogeneous connectivity mechanism.

性における評価値を表している．なお，ここで異なる接着強度を有するモジュール群はランダムに分布させるものとした．この結果から，均質な着脱特性を有する場合（物理的相互作用を変化させない場合）に比べて，ある種の不均質な着脱特性を有するSlimebot（物理的相互作用を変化させる場合）の示す環境適応度が高くなる場合が存在することが示唆されている．

## 4. 複雑ネットワークに基づく解析

前節の通り，物理的相互作用を変化させると適応能力が向上することが確認された．そこで，着脱特性が均質な場合と不均質な場合における形態制御の違いと適応能力の違いについて検証することで，情動的相互作用と物理的相互作用の連関様式のあり方を考察する．この目的のために，本研究では，Slimebotを結合振動子系ネットワークとみなし，複雑ネットワークに基づく解析を行う．ここでは，拡張したラプラシアン行列の固有値解析を用いてSlimebotの同期現象の特徴を抽出することで，着脱特性が均質な場合と不均質な場合のネットワーク構造の違いを観察する．以下に，その手法と解析結果を示す．

### 4.1 ラプラシアン行列を用いた静的ネットワークの同期現象の特徴抽出手法

本研究では，結合振動子系の同期化現象の解析に使われるラプラシアン行列<sup>8)</sup>を導入する．ラプラシアン行列とはネットワークの結合状態を表す行列で以下の式で表わされる：

$$L_{ij} = k_i \delta_{ij} - a_{ij} \quad (6)$$

ここで， $k_i$ はそのノードが持つリンクの数， $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタ， $a_{ij}$ は結合行列であ

る．次に，このラプラシアン行列の固有値を昇順に並べ，逆数を取る．これを縦軸にインデックス，横軸に固有値の逆数を取った両対数グラフにすると，ネットワークの振動子の同期現象の時間発展のグラフと同じ特徴を持つグラフが得られる．したがって，ラプラシアン行列の固有値解析を行うことで，同期現象の時間発展を直接的に観察することなく，そのネットワークの同期化現象を抽出することができる．しかしながら，ラプラシアン行列は結合トポロジーが変化しない静的ネットワークに対して適用されるものなので，動的に結合トポロジーが変化するSlimebotの特徴を抽出するには不十分である．

### 4.2 ラプラシアン行列の拡張

本稿では動的ネットワークの構造を抽出するため，ラプラシアン行列を時間に対して拡張して用いる．具体的には，結合をある時間窓で平均することで結合状態を確率で表現する．次に，ある閾値によりその時間窓での結合の有無を判定する．この結合行列からラプラシアン行列を生成することにより，ある時間でのスナップショットではなく，ダイナミクスを記述することが可能となる．ここで重要なのは，時間窓の大きさ・時間窓をどの時間に設定するか・閾値の大きさという3つのパラメータを，抽出したい特徴に合わせて適切に決める必要があるということである．

### 4.3 解析結果

以上に基づき，着脱特性が均質な場合（物理的相互作用を変化させない場合）と不均質な場合（物理的相互作用を変化させる場合）のSlimebotに対して拡張したラプラシアン行列の固有値解析を行った．

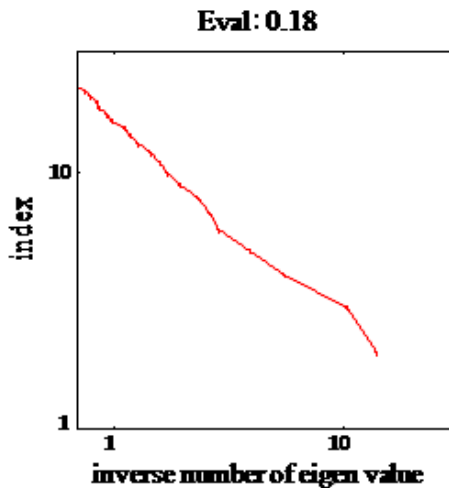


Fig. 5 : Eigen value of laplacian matrix in the case of homogeneous connectivity mechanism.

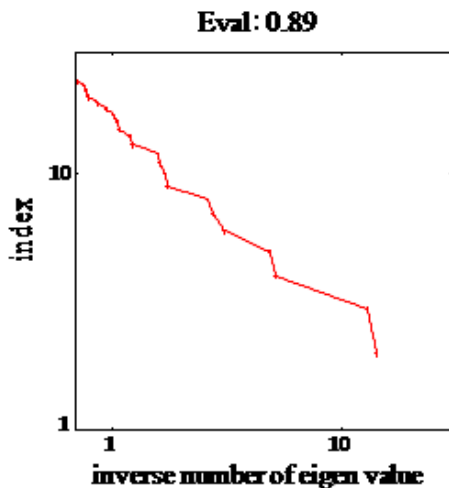


Fig. 6 : Eigen value of laplacian matrix in the case of heterogeneous connectivity mechanism.

はじめに、着脱特性が均質で環境適応性が低い場合と不均質で環境適応性が高い場合を比較する。解析結果をFig. 5, Fig. 6に示す。このグラフは、障害物を通り抜ける際のSlimebotに対して拡張したラプラシアン行列の解析を行った結果のグラフである。グラフの上の数値は環境適応度となっている。グラフを比較してみると、着脱特性は均質な場合のプロファイルはなだらかに減少している。それに対して、着脱特性が不均質な場合のプロファイルは階段状になっている。ネットワークが密に

結合している場所と疎に結合している場所の混在している階層構造を持つ場合、同期現象が段階的に行われるため、同期現象の特徴を有するラプラシアン行列のプロファイルは階段状になる。したがって、着脱特性が不均質な場合（物理的相互作用を変化させる場合）、均質な場合（物理的相互作用を変化させない場合）にはみられないようなクラスターや長距離相関といった階層構造が形成されるということを示している。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、筆者らがこれまでに開発を進めてきた粘菌型モジュラーロボットSlimebotを事例として、情報の相互作用と物理的相互作用の間のあるべき連関様式を考察した。具体的には、まず情報の相互作用を固定することで、物理的相互作用の環境適応度を与える効果を定量的に検証することを試みた。その結果、Slimebot内部の構造にクラスターや長距離相関などの階層構造が形成されている場合に環境適応度が高くなることが示された。このことから、拡散的相互作用のように情報の相互作用が単純なものに限定されていたとしても、物理的相互作用を変化させることで環境適応性が向上するということを示唆している。

今後の課題として、Slimebot内部にどのような階層構造が形成されることが重要であるかを具体的に検証する。また、今回用いたモデルよりさらに結合トポロジーが動的に変化するような、流動性の高いモデルを用いた、拡張ラプラシアン行列による検証も行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現 - 移動知の構成論的理解 - 」(領域番号454) および，「東北大学脳科学グローバルCOE脳科学を社会に還流する教育拠点」からの援助によって行われました．ここに感謝の意を表します．

## 参考文献

- 1) H. Asama, et al., "System Principle on Emergence of Mobiligence and Its Engineering Realization," *Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1715-1720, 2003.
- 2) 清水正宏, 高橋正康, 川勝年洋, 石黒章夫:「制御系と機械系の有機的カップリングを活用したモジュラーロボットの創発的形態制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.6, pp.718-724 (2005)
- 3) S.C Goldstein, Programmable matter *IEEE*, Vol.38, pp.99-101, 2005.
- 4) M. Yim, C. Eldershaw, Y. Zhang, and D. Duff, Self-reconfigurable robot systems: PolyBot, *J. of Robotics Society of Japan*, Vol.21, No.8, pp.851-854, 2003.
- 5) A. Castano, W.-M. Shen, and P. Will, CONRO: Towards miniature self-sufficient metamorphic robots, *Autonomous Robots*, pp.309-324, 2000.
- 6) S. Murata, K. Kakomura, H. Kurokawa, Docking experiments of a modular robot by visual feedback, *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.625-630, 2006.
- 7) M. Shimizu, T. Kato, M. Lungarella, and A. Ishiguro, Adaptive Reconfiguration of a Modular Robot through Heterogeneous Inter-Module Connection, in *Proc of IEEE ICRA*, pp.3527-3532 (2008)
- 8) A. Arenas, A. Dfaz-Guilera, and C. Perez-Vicente, Synchronization Reveals Topological Scales in Complex Networks, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.96., 114102(2006)