着脱特性の不均質性を活用したモジュラーロボットの適応的形態制御

Adaptive Morphology Control of a Modular Robot by Exploiting a Heterogeneous Connectivity Mechanism

○清水 正宏 (東北大) 河野 紀明 (名古屋大) Max Lungarella (東大) 正 石黒 章夫 (東北大)

Masahiro Shimizu, Tohoku University, shimizu@cmplx.ecei.tohoku.ac.jp
Noriaki Kono, Nagoya University
Max Lungarella, The University of Tokyo
Akio Ishiguro, Tohoku University

Abstract: This paper intensively investigates how heterogeneity of system components influences the adaptability of the resultant behavior by taking a modular robot as a practical example. To this end, we have introduced different adhesiveness between the modules. Simulation results strongly support that a certain heterogeneity significantly improves the adaptability that can not be achieved only by homogeneous modules.

Key Words : Mobiligence, Modular robot, Heterogeneity, Emergence

1 はじめに

生物は非常にプリミティブなものであっても、非構造的で予測不能的に変化する環境 (無限定環境) の下で適応的に振る舞う知 (移動知) を有している [1]。このような移動知は、いかなる原理の下で発現しているのであろうか。また、移動知を発現するような人工物は、どのようにして構築可能であろうか。これらの問題に取り組む際に重要となるのは、環境適応的な振る舞いにおいて、脳、身体、環境間の相互作用が存在するといった事実に着目することである。すなわち、行動主体の環境適応機能の発現には、主体自身の自発的移動が大きく関与している。この背景にあるメカニズムを効果的に考察するためには、初動段階からいたずらに複雑なロコモーション様式を採り上げるのは得策ではないと思われる。

このような考察に基づき、筆者らのグループでは、原初的なロコモーション様式として、アメーバ様ロコモーションに着目している。そして、アメーバ様ロコモーションを発現するモジュラーロボット Slimebot を開発し、シミュレーション、ならびに実験によりその有効性を示してきた [2]。Slimebot の振る舞いは、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 (ペルクロテープ) 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。これまでの Slimebot 研究においては、モジュール間の接着強度に関して、その強度が弱すぎても強すぎてもシステムとして破綻すること、環境適応的に振る舞うためには適切な強度が要請されること、が明らかとなっている。すなわち、接着強度が弱すぎる場合には、Slimebot は高い形態可変性を有する代わりに低い形態維持能力を示す。反対に、接着強度が強すぎる場合には、Slimebot は高い形態維持能力を有する代わりに低い形態可変性を示す。このように接着強度に関して、形態可変性と形態維持能力の間に Well-balanced coupling が成立している場合には高い環境適応性を示す。この Well-balanced coupling は一意に決定されるものではなく、Slimebot の置かれている環境に依存してそれぞれ異なったバランスが存在する。環境によっては、接着強度がより弱く設定されているほうが適応性が高い場合もあり、また反対により強く設定されているほうが高い場合もあることが確認された。すなわち、これらの

結果は、Slimebot の発現する環境適応機能の本質的な向上に関して、モジュール群における接着強度分布の時空間構造が重要であることを示唆している。

そこで本研究では、Slimebot に着脱特性の不均質性を導入した場合に、環境適応機能に現れる影響を議論することを目的とする。この目的のために、まず、均質な着脱特性を有するモジュール群から構成される Slimebot に関して、モジュール間の接着強度を変化させたときの環境適応能力を計測する。そして、不均質な着脱特性を有するモジュール群に関しても同様に環境適応能力を評価し、均質な場合と不均質な場合の結果を比較する。その後、Slimebot の発現する環境適応能力と不均質な着脱特性の空間構造との関係を議論する。

シミュレーションの結果、興味深いことに、均質な着脱特性を有する Slimebot の示す最も高い環境適応度に比べて、ある種の不均質な着脱特性を有する Slimebot の示す環境適応度が高くなる場合が存在することが観測された。さらに、発生過程における Steinberg の熱力学モデルに基づいた接着強度を採用すると、環境適応性の高い不均質なモジュール群分布を定常的に生成できることを確認したので報告する。

2 アメーバ様ロコモーションを発現するモジュラーロボット:Slimebot

筆者らは、結合振動子系の各振動子に単純な運動機能と、機能性素材 (ペルクロテープ) による状況依存的な自発的着脱機構を実装した物理的実体を与えることで、アメーバ様ロコモーションを発現するモジュラーロボット Slimebot を開発した。以下に、本研究で用いる Slimebot について、その機構系と制御系を説明する。

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 (無極性ペルクロテープ) を介して行われる。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

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

の大小を制御可能な機構を有している。各モジュールの運動機能は、腕の伸縮と地面との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持たず、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、目的光を検知するセンサも併せて有しているものとした。

制御系 ここでは、Slimebot モジュール (Fig. 1 参照) を複数集め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をしながら合目的的に形態を改変可能な制御方策を考える。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、その制御方策を説明する。

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、各モジュールが目的光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、目的光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凝集力を伴ったアメーバ様ロコモーションを発現する。

3 適応的運動機能の定量的評価手法

本研究では、Slimebot の発現する適応的運動機能に関して、着脱特性の均質、不均質の観点からの比較を行う。そこで、まず、適応的運動機能を定量的に評価するための評価式を定める。評価式は、モジュラーロボットとして行動するという制約のために、コヒーレントな群として形態を維持しつつ、柔軟に形態を改変し目的地へ向かうといった二律背反した要請を同時に満たす場合に、高い評価を示すものとするべきである。すなわち、評価式に求められる要請は、次の 2 つに集約される：

- (i) 迅速に目標地点にたどり着くほど、よい評価を与える。
- (ii) 形態のコヒーレンシーの維持度が高いほど、よい評価を与える。

次に、これら (i), (ii) の要請を反映して、次式の通り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 を構成する：

$$e_v = v_g - v_0 \quad (1)$$

$$e_c = \begin{cases} -c + c_0 & (c \leq c_0) \\ 0 & (c > c_0) \end{cases} \quad (2)$$

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_c 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、(i), (ii) の要請を同時に満たす場合に高い値を示す評価式 Eval を、次式の通り定義する：

$$\text{Eval} = a_v e_v \cdot a_c e_c \quad (3)$$

a_v , a_c は (i), (ii) それぞれの正規化定数を表している。

4 シミュレーション結果

4.1 均質な着脱特性を有する場合の適応的運動機能

式 (3) に基づき、モジュール間の接着強度を変化させた場合の適応的運動機能の評価を行った。シミュレーション条件は、モジュール数：200、初期形状は円盤形状、円筒状の障害物 2 つとし、目的光を紙面上方から照射した。各評価値にはモジュール群の初速度ベクトルを変化させた、6 試行の平均を採用している。

Fig. 2: Relationship between the connection strength and the index of performance.

得られた結果を Fig. 2 に示す。接着強度が非常に弱い、もしくは非常に強い場合に低い評価値を示していることが見てとれる。これらの結果のスナップショットを Fig. 2(a),

(c)に示す。Figure 2(a)では、接着強度が非常に弱いために、形態的可変性は優れているが、そのためにコヒーレンシーの維持が困難となっている。逆にFig. 2(c)では、接着強度が非常に強いために、コヒーレンシーの維持が容易に行える反面、形態的可変性が損なわれ、結果として障害物の間でスタックを起こしている。一方、適切な接着強度では高い評価値を示している。このときのスナップショットをFig. 2(b)に示す。このとき、形態的可変性とコヒーレンシーの維持といった特性が、同時に発現することにより適応的運動機能が発現している。

4.2 不均質な着脱特性の導入

いまいちどFig. 2に注目すると、接着強度が強い場合(a)、弱い場合(c)それぞれで、形態的可変性とコヒーレンシーの維持度といった二律背反した特性が強く表れている。ここで、これら接着強度を空間的に混在させることを考える。すると、形態的可変性とコヒーレンシーの維持の両特性が空間的に混在することとなり、それらの相乗効果が現れることが期待される。すなわち、異なる接着強度の空間的混在といった着脱特性の不均質性により、均質な着脱特性からは発現することのなかった適応的運動機能が現れることが期待される。ここでは、上記検証を行うための手法について説明する。

研究の初期段階から、不均質な着脱特性に特徴的にみられる適応的運動機能を効率的に抽出するために、簡便かつ恣意性のない不均質性を有する着脱特性について議論を行うべきである。そこで、着脱特性の不均質性として、接着強度は大小2種類とし、それらの空間分布は一樣なものとする。このために、本研究ではおのおのが接着強度の異なるベルクロテープを有する、2種類のモジュールを用意する。以下説明の便宜上、2種類のモジュールをそれぞれモジュールA、モジュールBと呼ぶ。また、モジュールA-A間、モジュールB-B間の接着強度を W_{AA} 、 W_{AB} 、 W_{BB} とする。ここでは、大小2種類の接着強度を実現するために、異種モジュール間では接着強度が大きく、同種モジュール間では接着強度が小さくなるような接着強度の関係をを用いる：

$$W_{AB} > W_{AA} = W_{BB} \quad (4)$$

このような接着強度の関係を有するモジュールA、Bを空間的に一樣に分布させることにより、大小2種類の接着強度がモジュラーロボット内部に一樣に分布する。

4.3 不均質な着脱特性から発現する適応的運動機能

式(4)の接着強度の関係を導入し、先ほどの均質な着脱特性(4.1節)と同一シミュレーション条件において実験を行った。得られた結果を、Fig. 3に示す。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($W_{AB} = W_{AA} = W_{BB}$)は均質な着脱特性における評価値を表し、全体はこの領域を境界として鏡面对称な図となっている。

図中の接着強度が80と120から構成される不均質な着脱特性を有する領域周辺において、もっとも優れた評価値

Fig. 3 : Performance of the heterogeneous connectivity mechanism.

を示していることが見てとれる。それぞれの接着強度を均質な着脱特性の観点から見ると、接着強度80と120はそれぞれ最適な状態から外れた接着強度であることに気が付く。具体的には、80は最適な設定から接着強度を弱くした、形態可変能力に偏った接着強度であり、120はその逆に接着強度の強い、コヒーレンシーの維持能力に偏った接着強度である。すなわち、形態的可変性とコヒーレンシーの維持度といった二律背反する特性を、空間的に分布させたことにより、それらの相乗効果が発現し、均質な着脱特性より優れた適応的運動機能が発現したことが見てとれる。

4.4 不均質な着脱特性の空間構造の重要性

4.3節では、不均質な着脱特性を導入することにより、均質な着脱特性を有する場合よりも優れた適応的運動機能が発現することを確認した。しかしながら、不均質な着脱特性を議論する際、その空間分布は適応的運動機能の発現にどのような特性をもたらすのかを明らかにするために、本節では前述の一樣な分布に加えて、Fig. 4に示す4つの不均質な着脱特性の初期空間構造を用いて、同一実験を行った。得られた結果をFig. 5に示す。

Fig. 5から、不均質な着脱特性の空間構造の違いが、適応的運動機能の発現に大きく影響することがわかる。ここで、注目すべき点は、Fig. 5のA~Dからは、Fig. 3に見られたような、均質な着脱特性を大きく上回る評価値が存在しないということである。すなわち、今回採用した円筒状障害物の存在する環境においては、優れた適応的運動機能の発現には、不均質な着脱特性が一樣に分布した空間構造が重要であることがわかる。

Fig. 4 : Connectivity distribution used for comparison of spacial distribution of the heterogeneous connectivity mechanism.

Fig. 5 : Performance emerged from difference of the spatial connectivity distribution.

4.5 不均質な着脱特性が一様に分布した空間構造の熱力学的な保証

4.4 節において、不均質な着脱特性から優れた適応的運動機能が発現するためには、その空間構造は一様であることが重要であるとわかった。ここでは、その一様な空間構造が自己組織的に生成されることを示す。

この目的のために、細胞間接着力の差異による形態形成に関する M. S. Steinberg の研究 [3] を参考にする。ここでは、2 種類の細胞を考えた場合に、それらの細胞間接着力の大小関係を変化させることにより、その大小関係に特徴的な細胞群の形態が形成されることが知られている（このモデルは Steinberg の熱力学モデルとして知られている (Fig. 6)）¹。本研究において、不均質な着脱特性を導入する際（4.2 節参照）に Fig. 6 の 1 の大小関係を用いたことに注意されたい。すなわち、Steinberg の熱力学モデルによって、本研究で採用した接着強度の関係式 (4) による熱力学的な安定状態は、不均質な着脱特性の一様に分布した空間構造であることが保証されているのである。

また、本節ではその検証を行った。Figure 7 にその結果を示す。ここでは、Fig. 7(a) に示すモジュール A, B の初期配置から始めて、円筒状障害物に多数回接触させた場合のモジュール間結合数の時間発展を示している。ここから、モジュール A-B 間の結合数が増え、モジュール A-A, B-B 間の結合数が減っていることが見てとれる。これは、障害物に接触する度に、モジュール A, B が一様な空間構造になるように混ざり合い続けていることを意味する。図中のスナップショットにおいて、時間的推移にしたがって、モジュール A, B の配置がランダムな分布に近づいていることに注意されたい。このようにして、接着強度の関係式 (4) を用いることにより、不均質な着脱特性の一様な空間構造が自己組織的に生成される。

Fig. 6 : Steinberg's thermodynamic model.

¹ 当研究グループでは、これらの大小関係をモジュール間の接着強度に対応させることにより、Slimebot において同様に形態形成が可能であることを確認している [4]。

Fig. 7 : Time evolution of the number of connection among module types.

5 まとめおよび今後の課題

本研究では、Slimebot に着脱特性の不均質性を導入した場合に、環境適応機能に現れる影響を議論した。シミュレーションの結果、均質な場合と不均質な場合の結果を比較したところ、均質な着脱特性を有する Slimebot の示す最も高い環境適応度に比べて、ある種の不均質な着脱特性を有する Slimebot の示す環境適応度が高くなる場合が存在することが観測された。さらに、発生過程における Steinberg の熱力学モデルに基づいた接着強度を採用すると、環境適応性の高い不均質なモジュール群分布を定常的に生成できることを確認した。今後は、複雑ネットワークの知見に基づく解析・考察を進める予定である。

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）からの援助によって行われた。ここに謝意を表します。

文献

- [1] H. Asama, et al.: "System Principle on Emergence of Mobiligence and Its Engineering Realization", in 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] M. S. Steinberg: "Reconstruction of Tissues by Dissociated Cells, Science", 141, 3579, 401-408(1963).
- [4] 石黒章夫, 松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 「制御系— 機構系間の連関を通じた自己組み立て・自己修復の実現」, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.7, pp.881-888(2006)