制御系と機構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

清水 正 宏^{*1} 高 橋 正 康^{*1} 川 勝 年 洋^{*2} 石 黒 章 夫^{*1}

Real-time Morphology Control of a Modular Robot by Exploiting the Interplay between Control and Mechanical Systems

Masahiro Shimizu^{*1}, Masayasu Takahashi^{*1}, Toshihiro Kawakatsu^{*2} and Akio Ishiguro^{*1}

This paper discusses a fully decentralized algorithm able to control the morphology of a modular robot, consisting of many identical modules, according to the environment encountered. One of the significant features of our approach is that we explicitly exploit an “emergent phenomenon” stemming from the interplay between control and mechanical systems in order to control the morphology in real time. To this end, we particularly focus on a “functional material” and a “mutual entrainment” among the nonlinear oscillators, the former of which is used as a connection mechanism between the modules, and the latter of which plays as the core of the control mechanism for the generation of locomotion. Preliminary simulation results indicate that the proposed algorithm can induce “protoplasmic streaming,” which allows us to successfully control the morphology of modular robot in real time according to the situation without losing the coherence of the entire system.

Key Words: Modular Robot, Emergent Phenomena, Protoplasmic Streaming, Functional Material, Mutual Entrainment, Autonomous Decentralized Morphology Control

1. は じ め に

ロボティクスの分野では、近年、2足歩行ロボットやペットロボットなど高度な移動機能を有する様々なロボットが開発されている。しかしながら、それらの動きは、設計者があらかじめ想定した条件下でいかなる行動をするかを明示的に作り込み、予定調和的に制御されているに過ぎない。一方、動物は、極めてプリミティブなレベルと分類されるものであっても、動的かつ予測不能的に変動する環境（無限定環境と呼ぶ）においても、実時間かつ合目的に行動を自己組織化しながら対処する「知」を有している。このような「生存脳機能」とでも呼ぶべき「知」は、いかなる原理によって発現されているのであろうか？ 筆者らはこれまでの研究を通して、有限な物理的・計算的資源を有する行動主体が、無限定環境において実時間かつ合目的に行動を自己組織化しながら対処していくためには、「創発現象」を活用する以外に方策はない、という作業仮説の重要性を認識するに至った。

そこで本研究では、モジュラーロボットの形態制御を事例と

して取り上げ、上記作業仮説の妥当性の検証を通して、創発システムの設計原理構築に向けての知見を獲得することを第一義的な目的とする。モジュラーロボットは、複数の機械ユニット（以下、モジュール）から構成され、これらモジュール群の相対位置関係を状況に応じて能動的かつ合目的に改変することができるため、従来の固定形態に基づくロボットに比べて優れた能力（適応性、耐故障性、拡張性、柔軟性など）を発現することが期待されている[1]~[5]。このような背景から、これまでに様々なモジュラーロボットの形態制御手法が提案されているが、それらほとんどの研究においては、

- 所与の形態下での各モジュールの制御が主として議論されている。
- モジュールどうしを剛性の高い機構を介して機械的・電磁的に結合する方策が多用されている。
- ある形態から別の形態への改変を扱った研究は存在するものの、それらのほとんどは形態改変をモジュールの再配置といった中央集権的な計画問題に帰着させている。
- モジュール単体では入手困難な大域的情報の存在を仮定して、形態制御の方策が議論されている。

といった問題点を有している。モジュラーロボットが本質的に有する優れた特徴を引き出すためには、構成要素である各モジュールの制御は自律分散的になされるべきであり、さらに発現する形態はモジュール間ならびにモジュール群とそれを取り巻く環

原稿受付 2004 年 5 月 24 日

^{*1}名古屋大学大学院工学研究科

^{*2}東北大学大学院理学研究科

^{*1}Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{*2}Graduate School of Science, Tohoku University

境との相互作用の中から「創発」することが望ましい。

そこで本研究では、局所的に入手可能なセンサ情報のみを用いて、形態を合目的ならびに実時間で変更可能な、モジュラーロボットの創発的制御方策の構築を目的とする。この要請に対して、本研究では、「制御系と身体系の有機的連関を通して、両者の相互作用の活用が期待でき、無限定環境に対する実時間適応性といった興味深い現象が創発する」との作業仮説を採用する。

このため、本研究では、(1) 機能性素材の有する力学的特性の活用、ならびに (2) 非線形振動子の相互引き込みを活用した原形質流動現象の誘起という二つの工夫を主として導入する。そして、前者をモジュール間の結合制御機構として、そして後者をロコモーションパターン生成の中核的な機構として活用することにより、モジュラーロボットの創発的な形態制御方策の構築を試みる。以下、それぞれの工夫の意義を端的に説明する。

これまでのモジュラーロボットでは、モジュールどうしを剛性の高い結合機構によって、機械的・物理的に接続する手法が多用されている。しかしながら、このような結合形態の下では、モジュールどうしの接続も明示的に制御しなければならないため、最終的に必要とされる制御アルゴリズムは大規模かつ複雑なものとなることが不可避となる。さらに、剛性の高い結合機構を介してモジュール群を接続させると、モジュラーロボットが本質的に有する環境変化に対する柔軟性といった優れた特徴を低減させてしまう可能性も否めない。そこで本研究では機能性素材に着目する。例えば、卑近なものとしてベルクロテープを眺めてみる。ベルクロテープは、テープどうしが接触すると容易に結合し、さらに結合したもののどうしに降伏応力以上の負荷がかかると自動的に脱離するという特性を有している。この素材自体が有する力学的特性を活用することで、形態制御に自発的かつ創発的特性が発現することが期待される[†]。

上記素材の力学的特性を活用するという条件下で効率よくモ

[†]降伏応力以上の力がかかる結合部は自動的に脱離するため、モジュラーロボットと環境との間で生じた矛盾を吸収することも期待できる。剛性の高い結合機構の下では、このような状況が起こらないように四六時中絶妙な制御を行うことが要求され、必然的にその制御の負荷は極めて大きくなるであろう。本研究ではある意味、機能性素材にモジュールどうしの脱着の制御を担わせている、と換言することもできる。近年、ソフトロボティクスの分野に代表されるように、制御系と機構系のダイナミクスを有機的に干渉させる重要性が認識されつつある。筆者らの知る限り、本研究は、モジュラーロボットの制御にその思想を明示的に導入した初めての研究と言える（モジュラーロボットのような本質的に超多自由度が存在することが前提である機構系には、このような思想はそもそも必須となるはずである）。

^{††}「チープ」という言葉は、Pfeifer らの唱える設計原理 [8] に倣い、「簡便な」という意味合いのほか、「環境や身体系の力学的特性を活用することによってその制御則は簡便なものとなる」という思想に基づいていることを明示的に示すために用いた。

^{†††}本稿で現在用いているベルクロテープは、(株)クラレのナイロン製マジックテープである。その特性は、同社が試験データとして公開しており、そのデータに基づくテープの面に対して法線方向剥離強さは $1.01 [\text{gf}/\text{mm}^2]$ である。筆者らは、そのベルクロテープを幅 $20 [\text{mm}] \times 70 [\text{mm}] = 1,400 [\text{mm}^2]$ を単位として、他モジュール 1 機を結合させた予備実験をすでに行っている。この場合、他モジュール 1 機との結合時に実効的にベルクロテープにかかる法線方向剥離強さは $1,414 [\text{gf}]$ となり、現在製作しているモジュール実機の重量が約 $700 [\text{g}]$ であることを考えると、本稿におけるベルクロテープは十分に結合可能な特性を示していると考えられる。

[†]現在製作している実機モジュールにおいては、赤外線伝送により実装することを検討している。

ジュラーロボットの形態を制御するために、本研究ではモジュール群に原形質流動を起こさせる制御則を考える。粘菌をはじめとする生物でも観察される [6] ように、原形質流動を発現させるためには、モジュラーロボット内部に適切な振動子間の位相勾配を発生させる必要がある。そこで本研究では、各モジュールに非線形振動子を実装し、これら振動子間の相互引き込みを通してモジュール群内部に原形質流動を生起させるのに適した等位相面を構成する。この等位相面に基づくタイミングで各モジュールを動作させることにより、最終的に安定かつ継続した原形質流動の発現を目指す。

本研究は現在初動段階にあるため、本稿では特に、二次元上に配置したモジュラーロボットの形態制御を試みる。具体的には、機能性素材の力学的特性を活用した自発的な脱着を介して、モジュール群全体に原形質流動を誘起させる制御方策の構築を目指す。シミュレーションの結果、比較的「チープ」な^{††}制御方策ながらも、周囲の状況に応じて妥当なモジュールの移動が自発的に行われることを確認したので報告する。

2. 関連研究

本章では、本研究に関連するいくつかの先行研究を端的に紹介する。Yim らの PolyBot [2]、黒河らの MTRAN [5] は、モジュラーロボットを自律型の実機レベルで達成している研究である。前者は、ハードウェア、ソフトウェアともに整理されており、特に専門知識を有さない人間もある程度の実機制御が可能となっている。しかしながら、形態変形のためには、人間の手による組み換えが必要であるという問題点が挙げられる。後者は、モジュラーロボット単独による、自律形態変形を実現している。しかしながら、現状では形態変形を計画問題に帰着させているため、中央集権的な制御方策が必要とされている。横井ら [7] は、波動場を用いた情報交換機構を提案しており、シミュレーションにおいて重力の存在する環境下での階段の昇降タスクを可能とするアメーバ型ロボットを実現している。しかしながら、実機でどのように実現するか議論はなされていない。

3. 提案手法

本章では、提案するモジュラーロボットについて、その機械構造ならびに制御則を述べる。

3.1 提案するモジュラーロボットの機械構造

各モジュールは Fig. 1 に示すような機械構造を持ち、モジュール間の結合は機能性素材（ベルクロテープ^{†††}）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

Fig. 1 Mechanical structure of a module employed. (Left) The top view. (Right) The side view

な複数の腕[†]と地面との接地摩擦の大小を制御できる機構を有している。

各モジュールの移動は、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は持たず、複数のモジュールが協調して初めてモジュールの移動が可能となる。さらに、2種類の光を検知するセンサも併せて有しているものとした^{††}。2種類の光とは、目的地の所在を表す目的光、モジュールが群の外縁部であることを認識するための周囲光のことである。

3.2 提案するモジュラーロボットの制御則

以上に示される機械構造の下で、モジュール群に安定した形態でロコモーション生起が可能な自律分散の制御則を考える。本稿では各モジュールに非線形振動子を実装し、これら振動子間の相互引き込みを通してモジュール群内部に原形質流動を生起させることに適した等位相面を構成する。

3.2.1 機能性素材のモデル化

初めに結合機構のモデル化について説明する。機能性素材の力学特性は、降伏応力の設定により特徴付けられモデル化される。したがって、脱離は、結合部位間における脱離方向への応力が設定された降伏応力を超えた際に起こる。一方、結合は、各モジュールの腕が接触する位置で自発的に起こるものとした。

3.2.2 Active モードと Passive モード

次に、各モジュールの基本動作を定義する。各モジュールは、自身が移動する「Active モード」と、自身は移動しない「Passive モード」と呼ばれる二つの動作モードを持つ。Active モードでは、各モジュールは結合している腕の伸縮を意図的に行うと同時に、地面との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戻すと同時に地面との摩擦を高くするモードである。このモードにあるモジュール自身が動くことはないものの、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 (Fig. 2 参照)。

3.2.3 非線形振動子の引き込み現象による等位相面の構成

二つの動作モード (Active モードと Passive モード) の切り替えタイミング生成のために、各モジュールに次式のような VDP (van der Pol) 振動子を導入した：

[†]実機では、直動型のアシリンダにより実装される。

^{††}目的光と周囲光の2種類の光を選択的に検出可能なセンサ機構である。周囲光は、モジュラーロボットから見て、360度全方位から認識可能であると設定している。この2種類の光の検出は、外縁部のモジュールのみが検出可能のように設定した。なお、両方の光を検出した際には、目的光のみが認識されるように設定してある。

^{†††}これは、粘菌の偽足 (pseudopod) に相当するものであり、群全体が推進力を地面からの外力として得るために必須の機構である。この機構がない場合には、各モジュールの腕の伸縮によるアクチュエーションはモジュール群内部における内力としてしか作用しないため、群全体としての移動は不可能である。

[†]このような仕様を満たすのであれば、どのような非線形振動子モデルを用いてもよい。

^{††}本研究における VDP 振動子間の相互引き込みモデルは、嘉数ら [9] が導入したものと同様のものを、適切な位相勾配の生成のために導入している。しかしながら、本研究の重要な点は、機能性素材の動力学特性と、等位相面によって生成される速度ベクトルの分布を有機的にカップリングさせることにより、モジュラーロボットの内部に原形質流動を誘起させることである。この点で、自走機能を有するロボット群を議論する嘉数らの研究とは大きく異なる。

Fig. 2 A schematic of the active mode and the passive mode (A side view of the connected modules is shown for clarity)

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

ここで、 α_i は振動数を、そして β_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。次に、非線形振動子間の相互作用を規定する。相互作用として求められる要請は、拡散的な振る舞いを導入することである。より複雑な相互作用を想定することもできるが、研究の初動段階でもあることから、結合した振動子間の互いの位相差を平均化するように作用する、単純な相互作用を採用する[‡]。そこで、物理的に結合している振動子間には、嘉数らの研究 [9] を参考にして局所的相互作用を与えた。説明の便宜上、相互作用前のモジュールの振動状態を x_i^{tmp} 、相互作用によって更新された状態を x_i と表すことにする。具体的に用いた式を以下に示す^{††}：

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

式中の N_i 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ている。ここで、 N_i は形態変形に伴って、動的かつ離散的に変化するということに注意されたい。隣り合うモジュール群が最密充填構造を形成したときに、最も多い $N_i = 6$ となり、結合しているモジュールがない場合には、式 (2) は計算されない。従来の非線形振動子間の相互引き込みを議論する多くの研究においては、非線形振動子群のトポロジーは不変であるとされている。本稿においては、この点に関して多くの従来研究とは異なり、非線形振動子群のトポロジーが動的に変化する。

ここで、複数の VDP 振動子が式 (2) に従って相互作用する際に、一部の振動子に対して式 (1) における α_i の値に変化を与えることで、振動子間に有意な位相分布を効果的に構成することができる。そこで、モジュール群を円状に配置して、目的光を上方から照射した際の等位相面の様子を Fig. 3 に示す。原形質流動を効果的に発現させるために、次式のように α_i の値を設定した：

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.7: \text{目的光 (誘引物質) を検知したモジュール} \\ 1.3: \text{周囲光 (自分が群の縁であることを検知したモジュール)} \\ 1.0: \text{その他 (群の内部) のモジュール} \end{cases} \quad (3)$$

Fig. 3 Phase distribution created through the mutual entrainment among the VDP oscillators in a circular arrangement. The gray scale denotes the value of the phase at the corresponding point

Fig. 4 Mode alternation

ここで矢印は位相勾配方向を表している。また、Fig. 3 上方はモジュラーロボットにとって前方を意味している。

3.2.4 原形質流動の生成

原形質流動の生成のために、二つの動作モードの切り替えタイミングは、式 (1) による VDP 振動子の位相 θ_i と対応づけられる。本稿では、Fig. 4 に示すように、VDP 振動子の 1 周期 T における位相 2π は N_p 等分され、各位相区間に相当する時間 T/N_p において、Active モードと Passive モードのデューティ比 γ が設定されるものとした。すなわち、回転数 n の一般角を考慮した、任意の VDP 振動子の位相 $(n-1)\pi \leq \theta_i(t) < (n+1)\pi$ を N_p 等分し、各区間における Active モードと Passive モードの期間がそれぞれ T_a/N_p , T_p/N_p であるとする、デューティ比 γ の定義式は式 (4) となる：

$$\frac{T}{N_p} = \frac{T_a}{N_p} + \frac{T_p}{N_p}, \quad \gamma = \frac{T_a}{T_a + T_p} \quad (4)$$

次に、二つの動作モードと VDP 振動子間の相互引き込みにより発現した位相分布を対応づける。Fig. 3 のような等位相面

の下で、式 (4) の定義に従ってデューティ比 γ を設定すると、動作モード切り替えのタイミングが進行波としてモジュール群内部の位相が最も進んだ点 (VDP 位相勾配の頂上) からその周囲へ伝播する。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 F_i^m を、次式のように最近接モジュールとの位相差に比例するように与える：

$$F_i^m(t) = -k\{\theta_j(t) - \theta_i(t)\}, \quad (5)$$

ここで、 F_i^m は、ある時刻 t において、モジュール i の m 本目の腕にかかる伸縮に必要な力であり、 k は比例定数である。 θ_j は、モジュール i に結合した近傍モジュール j の VDP 振動子の位相を表す。この結果、各モジュールの実効的な腕の伸縮量は等位相面の法線方向で最も顕著となり、Fig. 3 の状況下ではモジュールは VDP 位相勾配の頂上に向かって自律分散的に移動しようとする。

各モジュールの腕の伸縮からモジュラーロボット全体の動きへの変換プロセスを、以下、より詳細に説明する。VDP 振動子の位相勾配により、モジュール i における各腕 m は、式 (5) に従って伸縮力を出力する。その結果、勾配の急峻な方向の腕に関してはより強い伸縮力を出力し、勾配のなだらかな方向の腕に関しては弱い伸縮力を出力することになる。さらに、勾配が正 (モジュール j がモジュール i よりも位相が進んでいる) の場合には腕を縮め、勾配が負 (モジュール j がモジュール i よりも位相が遅れている) の場合には腕を伸ばすことになる。したがって、腕の伸縮方向とモジュール i にかかる正味の合力の結果、Fig. 3 にも示すような位相勾配の等位相面の法線方向に対して、モジュール i が移動しようとする傾向が顕在化する。このような最終的に顕在化した方向を持つベクトルのことを、便宜上、「運動方向ベクトル」と呼ぶことにする。モジュール群内部で、この運動方向ベクトルがそろっている部分では、各モジュールはより効率的に腕を伸縮することが可能となっていることに注意されたい。すなわち、同じ等位相面上に位置するモジュール群であっても、その位置関係によって各モジュールの移動しやすさは大きく異なる。この等位相面上における運動方向ベクトルの分布の不均一性 (両側部は群内部に向かい、中心部付近は進行方向を向く) によって、群全体としてのコヒーレンスを維持しながら、モジュラーロボット全体を目的光に向かって推進することが可能となるのである。

4. シミュレーション結果

本章では、提案するモジュラーロボットシステムによる原形質流動の創発を、計算機シミュレーションによって検証する。本稿では、動力学に基づいたシミュレーションを行っている。具体的には、多体系の動力学解析や、分子動力学法で用いられるアルゴリズム (速度 Verlet 法) を用いて、シミュレーションにおける力学の時間発展を計算している。

4.1 問題設定

本稿では、障害物を有する空間において目的の光源に向かうことをタスクとして与える。目的の光源は図の上方から与えられ、モジュラーロボットは上方に移動するものとする。シミュレーション条件を以下に示す：

モジュール数：92, 563

初期配置：円盤状配置（各モジュールの間隔は、腕の自然長であり、各モジュールは最密充填構造を形成するように配置される）

障害物：円筒×2

デューティ比：0.6

VDP 振動子のパラメータ：

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.7 & (\text{目的光を検知した場合}) \\ 1.3 & (\text{周囲光を検知した場合}) \\ 1.0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

$$\beta_i = 1.0$$

$$\varepsilon = 0.01$$

4.2 原形質流動創発の検証

障害物回避タスクを用いた、モジュラーロボットの原形質流動創発の検証を行った。シミュレーションの結果を Fig. 5 に示す。左から順に、時間推移に従ったスナップショットとなっている。Fig. 5 (a), (b) は、それぞれ、モジュール数 92, 563 のシミュレーション結果を表す。どちらの結果においても、モジュラーロボットは、群全体のコヒーレンスを失うことなく環境適応的に行動している様子が見てとれる。これらの結果に基づき、以下の四つの観点から議論する：

第一に、機能性素材がロコモーションを生成する過程において、機能性素材によりもたらされる結合機構のダイナミクスが活用されているということが挙げられる。Fig. 5 (b) において、各モジュールの非線形な速度変化の伝播の誘起が始まり（時間ステップ 1000 の図）、群の外側左右に位置するモジュールが群中央に向かって動き始める。結果として、機能性素材の力学特性を活用した自発的なモジュール間の着脱が生じ、原形質流動が創発する。

第二に、モジュール数の違いにより、異なった環境適応行動が創発しているということが挙げられる。Fig. 5 (a) においては、円筒状の障害物間を通り抜けるように行動しているのに対し、Fig. 5 (b) においては、障害物を取り囲むように行動している。ここで、これらの行動は、あらかじめプログラムされているものではなく、完全に創発していることに注意されたい。

第三に、表面張力効果が、モジュラーロボットとしての群全体のコヒーレンスの維持に寄与していることが挙げられる。Fig. 5 (a) に示されるシミュレーションにおいては、時間ステップ 30000 の周辺において、目的光を一時的に遮断している。このような状況下では、モジュラーロボットは、円盤状の形態に変形している。これは、群の外側のモジュールが内側に向かって移動していることにより生じる表面張力効果によるもので、モジュラーロボットの表面積を最小にしようとする影響により円盤状の形

(a) The number of the modules: 92

(b) The number of the modules: 563

Fig. 5 Representative data of the transition of the morphology (see from the left to right in each figure). The thick circles in the figures are the obstacles

態を形成する。シミュレーションにおいて、この効果を含まないような α_i の設定の下では、群のコヒーレンスを保つことができないことも確認された[†]。

第四に、局所情報からの大域情報の生成が挙げられる。Fig. 5 においては、すでに述べたように創発的な行動が発現しているが、どのモジュールについても、あたかも目的光の位置を知っているかのように動いている。これは、VDP 振動子間の相互引き込みという局所情報から目的方向という大域情報が生成されたことを意味している。

4.3 自発的なモジュール間の着脱の検証

本稿における提案手法によって、環境変化に適応的に行動するために、モジュラーロボットは明示的な制御なしにモジュール間の自発的な着脱を行うことが期待される。そこで、提案するモジュラーロボットが障害物を回避する際に、モジュール間の脱離回数の時間発展を計測することで、自発的なモジュール間の着脱の検証を行う。

具体的な計測方法を以下に述べる。シミュレーション条件は、モジュール数を 64 に設定し、他のパラメータに関しては、4.1 節で紹介した条件と同様にする。この条件下では、およそ 14000 ステップのシミュレーション時間において、モジュラーロボットは、円筒状障害物の間を通り抜けるようにして乗り越えるこ

[†]本シミュレーションで採用したパラメータ設定の下では、群の外縁部に位置するモジュールの位相が遅れるため、これらのモジュールは群れの中心に移動しようとする力が常に働くことになる。この結果、表面張力と同等の効果がモジュール群全体にかかり、形態の安定性が保証されることになる。以前報告した研究 [10] では、周囲光検出時に α_i を 1.3 に変化させるといったことを導入していなかったため、群の形態の安定性の確保が困難であった。

Fig. 6 Time evolution of the number of spontaneous disconnection among the modules

とができる。次に、モジュール間の脱離回数の時間発展の計測であるが、シミュレーションの間、各 1000 ステップの時間枠の間にモジュール間の脱離回数を計測し、その時間発展を観察する。結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 において、横軸はシミュレーションの時間ステップを表し、縦軸はモジュール間の脱離回数の時間発展を表す。単純には、障害物を乗り越える際に、モジュール間の脱離回数が増えることが見てとれる。次に、時間発展に沿って、モジュール間の脱離回数とモジュラーロボットの行動の対応付けを行う。1000 ステップ付近では、シミュレーションを開始した直後であり、かつ障害物の干渉がないために、モジュール間の脱離が起こることはほとんどない。2000 ステップ付近において、モジュラーロボットは障害物に接触する。そして、環境適応的に自己の形態を変形させる過程において、自発的なモジュール間の脱離回数が増加する。やがて、8000 ステップ付近において、脱離回数の増加がピークを迎える。次に、9000 ステップに至るまでに急激なモジュール間の脱離回数の減少が見られる。これは、障害物とモジュラーロボットとの接触が少なくなり、形態を変形させる必要が無くなるためである。10000 ステップの付近では、再びモジュール間の脱離回数の増加が観察される。これは、群の大半が障害物を通過したことによって、表面張力効果が現れていることを示している。すなわち、一度障害物により変形を余儀なくされたモジュラーロボットが、この時間ステップの付近において、再び円盤状に近い形態に戻ろうとする効果が働いているということである。

5. まとめおよび今後の課題

本稿では、機能性素材の有する力学的特性の活用、ならびに非線形振動子の相互引き込みを活用した原形質流動現象の誘起、という二つの工夫を主として導入し、前者をモジュール間の結合制御機構として、そして後者をロコモーションパターン生成

の中核的な機構として活用することにより、モジュラーロボットの創発的な形態制御方策の構築を試みた。

シミュレーションの結果、提案する制御方策により、合目的かつ実時間適応的な制御が実現されることを確認した。ここでは、モジュール間の着脱に関して明示的な制御は一切行っていないことに注意されたい。モジュール間の着脱の制御は、すべて創発的に実現されるのである。その意味で、機能性素材はその問題を素材自体が有する力学的特性で「チープ」に解決し得るモジュール間結合制御機構である、言い表すこともできるであろう。

本質的に超多自由度を有するモジュラーロボットの形態を合目的かつ実時間適応的に制御するためには、本稿で示したような「制御系と身体系ダイナミクスの有機的干渉によって、両者の相互作用ダイナミクスの活用が期待でき、無限定環境に対する実時間適応性が向上する」という思想は、モジュラーロボットを自律分散的かつ創発的に制御する極めて重要な役割を果たすと考えられる。さらに、本稿で着目する原形質流動や表面張力効果は、モジュールの数が増えると発現するものであり、「量的な変化が質的な変化をもたらす」という創発性の一つの大きな要請を満足するものである。今後は、実際に二次元平面上において動作するモジュラーロボット実機を製作し、本制御方策の妥当性を検証するとともに、より流動性を高めたモジュラーロボットの構築を試みる予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「計算科学フロンティア」、ならびに（財）マツダ財団からの援助によって行われた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] T. Fukuda and Y. Kawauchi: "Cellular robotic system (CEBOT) as one of the realization of self-organizing intelligent universal manipulators," in Proc. of IEEE ICRA, pp.662-667, 1990.
- [2] M. Yim, C. Eldershaw, Y. Zhang and D. Duff: "Self-Reconfigurable Robot Systems: PolyBot," 日本ロボット学会誌, vol.21, no.8, pp.851-854, 2003.
- [3] Hydra Project (EU Project): <http://www.hydra-robot.com>
- [4] A. Castano, W.-M. Shen and P. Will: "CONRO: Towards Miniature Self-Sufficient Metamorphic Robots," Autonomous Robots, pp.309-324, 2000.
- [5] 黒河治久, 吉田英一, 神村明哉, 富田康治, 村田智, 小鍛治繁: "変形移動する自立モジュール型ロボット (M-TRAN)," 日本ロボット学会誌, vol.21, no.8, pp.855-859, 2003.
- [6] 矢野雅文, 三浦治己: "結合振動子による真性粘菌の情報処理," 数理科学, no.408, pp.15-22, 1997.
- [7] 横井浩史, 嘉数侑昇: "波動場を用いた自律的情報処理に関する基礎研究 (障害物回避問題へのアプローチ)," 日本機械学会論文集 (C 編), vol.59, no.564, 1993.
- [8] R. Pfeifer and C. Scheier (石黒章夫, 小林宏, 細田耕監訳): 知の創成—身体性認知科学への招待. 共立出版, 2001.
- [9] 嘉数侑昇, 高橋伸幸: "バイオミメティクスとモジュラーロボット," 日本ロボット学会誌, vol.21, no.8, pp.839-842, 2003.
- [10] 清水正宏, 石黒章夫, 高橋正康, 川勝年洋, 増渕雄一, 土井正男: "結合部位の力学的特性を活用したモジュラーロボットの形態制御," 第 16 回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.281-284, 2004.

清水正宏 (Masahiro Shimizu)

1979年9月19日生。2002年名古屋大学工学部物理工学科卒業。2004年名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻博士前期課程修了。現在、博士後期課程在学中。日本学術振興会特別研究員。ロボティクスに関する研究に従事。2005 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award 受賞。計測自動制御学会、分子シミュレーション研究会の会員。
(日本ロボット学会学生会員)

川勝年洋 (Toshihiro Kawakatsu)

1960年11月20日生。1988年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻博士後期課程単位認定退学。同年、九州大学理学部物理学科助手。1989年工学博士(京都大学)。1994年東京都立大学理学部物理学科助教授。1998年名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻助教授を経て、2001年東北大学大学院理学研究科物理学専攻教授。現在に至る。主として、高分子等のソフトマテリアルの統計力学に関する研究に従事。日本物理学会、日本化学会、アメリカ物理学会などの会員。

高橋正康 (Masayasu Takahashi)

1980年8月12日生。2003年名古屋工業大学生産システム工学科卒業。2005年名古屋大学大学院工学研究科計算理工学専攻博士前期課程修了。現在、富士通株式会社に在職中。

石黒章夫 (Akio Ishiguro)

1964年5月18日生。1991年名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻博士課程後期課程修了。同年、同大学助手。1997年同大学大学院工学研究科計算理工学専攻助教授。現在に至る。この間、チューリッヒ大学客員研究員。主として、創発システムならびにロボティクスに関する研究に従事(工学博士)。日本 AEM 学会論文賞、日本機械学会優秀講演論文賞、2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) Best Paper Award Nomination Finalist などを受賞。IEEE、日本機械学会、電気学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)