

単純な運動機能を持つ結合振動子系から創発する知能

石黒 章夫*, 清水 正宏*, 川勝 年洋**

* 東北大学 大学院工学研究科 電気・通信工学専攻

** 東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻

1 はじめに

動物はきわめてプリミティブな種と分類されるものであっても、非構造的で予測不能に変動する環境（無限定環境と呼ぶ）下で実時間かつ合目的に振る舞いを自己組織化しながら対処する「適応的な知」を有している。このような柔軟に環境に対処するための「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。平成 17 年度から始まった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、領域代表 浅間一教授（東京大学・人工物工学研究センター））のひとつの大きなミッションは、このような知の形態に焦点を当て、工学と生物学の有機的な連携を通してその発現原理と設計原理に関する非経験的¹なモデルを構築することにある²。筆者らの一部も参加しているこのプロジェクトでは、行動主体の能動的な動き（移動）に伴ってはじめて創発する知の形態の存在を仮定し、これを移動知（mobiligence）と名付けて議論を進めている [1]。以下、移動知の概念に関してもう少し敷衍したいと思う。

移動知とは、その定義から明らかなように、行動主体の移動無くしては発現し得ない知の形態である。つまり、行動主体が移動を止めるやいなや雲散霧消するような、掴みがたい存在形態をとる知である。移動はあらゆる動物が発現する最も根源的な能力であることを踏まえると、移動知はさまざまな種を通して幅広いスペクトルで存在する、普遍的な知の形態と言える。また、進化の累積性を考えると、われわれヒトが有する高次脳機能と呼ばれる知も、移動知を基盤として構築されていると仮定するのも自然であろう。さらには、動物もロボットもともに三次元物理世界下の存在として同一の力学法則に支配されている点では共通しており、ロボットに実装することを最初に考慮すべき最も本質的な知でもあるとも言えるであろう。それでは、このような知の形態はどのように工学的に実現されるのであろうか？また、それによって生み出される効用とはどのようなものなのであろうか？

¹ 「非経験的」という言葉は、観察者・設計者の経験や勘に基づく恣意性をできるだけ排除することの重要性を意味するために用いている。

² <http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>

本稿では、「有限な物理的・計算的資源を有する行動主体が生存脳機能を発現する（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。そして、創発現象を生起させるためには、行動主体の制御系（脳・神経系）と機構系（身体系）を有機的に連関させることが必要である」との作業仮説に基づいて筆者らが現在行っているモジュラーロボットを用いた事例研究を紹介しながら、移動知発現のための設計原理を模索してみようと思う。

2 採用するアプローチ

2.1 ミニマルデザイン

移動知の発現原理と構築原理を構成論的に理解するためには、最低限の設定から基本論理を探っていくという、いわゆる「ミニマルデザイン」あるいは「KISS(Keep-It-Stupidly-Simple) 原理」と呼ばれる立場に基づくことが肝要である。その際に重要となるのが、起点とすべき最低限の設定をどのようなものにすればよいのか、ということである。

筆者らは、結合振動子系を用いて、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を事例として考察を進めている。ただし、ミニマルデザインの思想に基づき、以下のような制約を意図的に課している：

- 単体では移動機能すら発現できないような単純な運動機能と物理的実体を各要素（非線形振動子）に与える。
- 要素間の情報のやりとり（相互作用の様式）は、局所（最近傍）かつ拡散的なものに限定する。
- すべてのモジュールは、同じ機能と構造を持つことにする（要素の同質性）。

2.2 なぜモジュラーロボット？

アメーバ様ロコモーションを示す可変形態型のモジュラーロボットを起点としたのは、主として以下の理由による：

- モジュラーロボットは、本質的に多自由度を有するシステムである。このため、その出自から機構系の空間的複雑性が高いため、振る舞い生成において創発の可能性が期待される。
- 状況に応じてシステム全体のかたちを能動的に改變しながら移動するモジュラーロボットは、アメーバ運動のような最も原始的なロコモーションの様式と合致する。意図的にこのような単純性・原初性に着目することによって、移動知発現のための設計論に関する知見が効果的に抽出できることが期待される。
- 単体では移動機能すら発現できないような単純な運動機能と物理的実体を各振動子に与えている。さらに、要素間の情報の相互作用様式は、局所的かつ拡散的なものに限定している。このような単純性から、「シンプルな要素集団からどこまで複雑なことができるのか」といった考察が行いやすくなる。
- これまでのロボティクスでは、歩行ロボットなどの固定形態のロボットをプラットフォームとして議論が行われてきた。本事例研究で採り上げるモジュラーロボットは可変形態であり、新しい知見の獲得が期待されるばかりでなく、事例の「基底性」を満たすためにも必要である。

次節では、筆者らが現在行っているモジュラーロボットの創発的実時間形態制御に関する事例研究を具体的に説明する [3]。

3 事例研究紹介：モジュラーロボットの創発的形態制御

3.1 提案手法

3.1.1 モジュラーロボット機構系の構造の特徴

各モジュールは図 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。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、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。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きさ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、誘引刺激に相当する目的地から発せられる光（目的光と呼ぶ）を、また自身がモジュラーロボットの内部に位

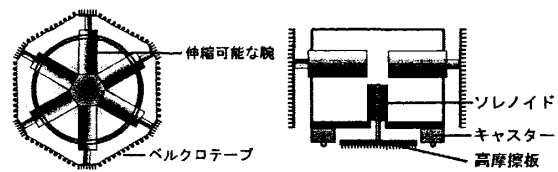


図 1: モジュールの機構系の上面図 (左) と側面図 (右)。

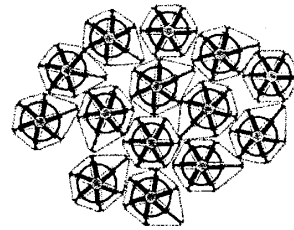


図 2: モジュラーロボットの概念図。

置するか外縁部に位置するかを検知するセンサも併せて有しているものとした。

3.1.2 提案するモジュラーロボットの制御則

本節では、提案するモジュール（図 1 参照）を複数個集めて図 2 のようなモジュール群を形成した場合、これを群としてのまとまり（コヒーレンシー）を維持しながら合目的に形態を改変可能な制御方策を考える。ここで注意すべきことは、実装すべき制御方策は群の形態やモジュール数に依存してはならない、ということである。この要請（すなわち拡縮性）を満たすために、筆者らは、非線形振動子群が発現する相互引き込み現象に着目した。具体的には、各モジュールに非線形振動子を実装し、これら振動子間（結合したモジュール間）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ならびに接地摩擦制御のタイミングの整合を図る。以下、その制御方策を端的に紹介する。

Active モードと Passive モード 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」と呼ばれる二つの基本動作モードを持つ。Active モードでは、各モジュールは結合している腕の伸縮を能動的に行うと同時に、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。

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：

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

ここで、 α_i は発振の振動数を、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設定する。相互作用として求められる要請は、非線形振動子間に引き込み現象を誘起させることである。そこで、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、単純な拡散的相互作用を採用する³。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、もっとも多い $N_i = 6$ となり、結合しているモジュールが無い場合には、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。本研究においては、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、モジュール群を円盤状に配置して、目的光を上方から照射した際の等位相面の様子を図 3 に示す。ロコモーション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：

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.7 & : \text{目的光を検知したモジュール} \\ 1.3 & : \text{外縁部に位置することを検知したモジュール} \\ 1.0 & : \text{その他 (群の内部) のモジュール} \end{cases} \quad (3)$$

同図において、上方はモジュラーロボットの進行方向に対応している。また、図中の矢印はその点における位相勾配の方向を示している。

ロコモーションの生成 効率的なロコモーションの生成のために、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 振動子の位相と対応づけられる。図 3 のような等位相面の下で、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

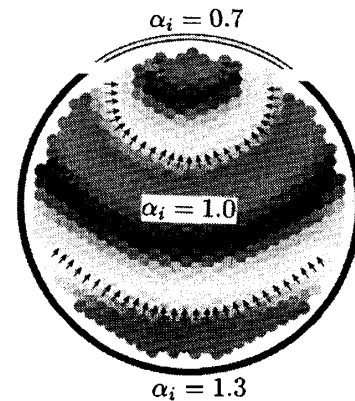
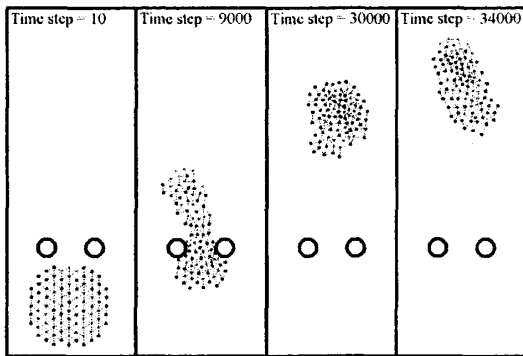


図 3: VDP 位相勾配によりモジュラーロボット内部に構成される等位相面。

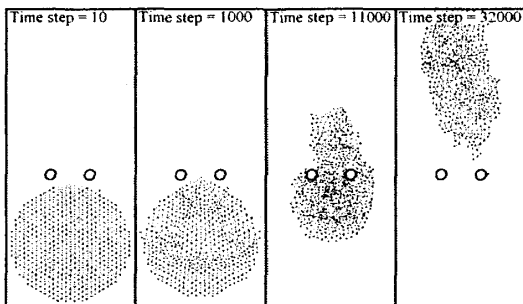
周囲へ伝播する。この際、各モジュールの Active モードにおける腕の伸縮に必要な力を、最近接モジュールとの位相差に比例するように与える。この結果、各モジュールの実効的な腕の伸縮量は等位相面の法線方向で最も顕著となり、モジュールは VDP 位相勾配の頂上に向かって自律分散的に移動しようとする。

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 における各腕は、位相勾配に比例し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、図 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。

³このような仕様を満たすものであれば、どのような非線形振動子モデルを用いても良い。



(a) モジュール数: 100



(b) モジュール数: 500

図 4: 円柱状障害物の存在する環境下における、モジュラーロボットの適応的形態変形。

3.2 シミュレーション結果

障害物が存在する環境下で目的光へと向かうタスクを事例として取り上げ、提案する手法のシミュレーションによる検証実験を行った。シミュレーション条件を以下に示す。モジュール数を 100, 500 とする二種類の条件を想定し、どちらの場合においても、モジュラーロボットの初期形態は円盤状形態を構成するものとした。各モジュールにおける VDP 振動子のパラメータに関しては、 $\beta_i = 1.0$, $\varepsilon = 0.01$ であるものとし、 α_i を式 (3) と同様に設定した。環境には、二つの円筒状の障害物が存在すると仮定した。

シミュレーションの結果を図 4 に示す。同図 (a), (b) はそれぞれ、モジュール数 100, 500 のシミュレーション結果を表している。どちらも左から順に、時間推移にしたがったスナップショットとなっている。どちらの結果においても、モジュラーロボットは、群全体としてのまとまりを失うことなく適応的に行動している様子が見てとれる。重要なこととして、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。図 4(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、同図 (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。

また、本シミュレーション結果においては、表面張力的な効果が群全体としてのまとまりの維持に寄与していることも重要である。図 4(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、周囲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へと変形している。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的な効果に由来するもので、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となる。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、群全体としてのまとまりを保つことができないことも確認された。さらに、群としてのまとまりの維持や耐故障性といった特性を発現させるためには、モジュラーロボットを構成するモジュール数にある種の臨界点が存在することも明らかになってきている [2]。今後のより詳細な考察を待たねばならないが、量的な変化から質的な変化が誘起されることは創発性の一つの重要な属性を満足しており、本提案手法からこのような現象が発現したのは極めて興味深い。

4 考察

本節では、本事例研究から得られた知見、ならびに移動知の研究メンバーとの議論を通して「おぼろげながら」見え始めてきた（と期待している）移動知の描像を、誤解を恐れずに現場から実況中継してみたい。

4.1 本事例研究から得られたこと

説明を容易にするため、図を用いることにしよう。図 5 は、行動主体の振る舞い生成における制御系と機構系の寄与度の配分を模式的に表したものである。図中の ▼印はスライダのつまみである。われわれはこのつまみを左右に動かして、制御系と機構系の寄与度の配分を自由に設定できるとする。それでは、まずこのつまみを一番左端まで動かしてみることにしよう。この状況下では、行動主体の振る舞い生成を制御系が 100% その役割を担っている。換言すれば、機構系が制御系の完全な支配下にある、フルコントロールの状態と言え

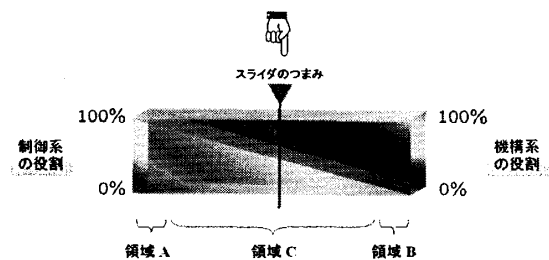


図 5: 行動主体の振る舞い生成における制御系と機構系の寄与度の配分。

る。現在のほとんどのロボットは、このような状況下（領域 A 付近）で動かされているといっても過言ではない。次に、スライダのつまみを一番右端まで動かしてみる。この状況下では、機構系が 100% の役割を担っており、最近注目を集めている受動歩行機械などがこれに相当する。受動歩行機械に簡便な制御を加えた準受動歩行機械などは、同図において領域 B 付近に存在していると言えるであろう。

同図を眺めてみると、現在のロボットの振る舞い生成においては、制御系と機構系の寄与度がきわめていびつに配分されていることに容易に気づくであろう。筆者らの主張を端的に述べると、生存脳機能の発現のためには領域 C のような寄与度の配分を考慮することが不可欠である、ということになる⁴。以下、もう少しこの点を掘り下げてみよう。

前節で紹介した事例研究においては、領域 C での連関様式実現を初動段階から強く意識して、機構系の工夫として機能性素材の有する力学的特性を活用したモジュール間着脱機構が、そして制御系の工夫として非線形振動子間の相互引き込み現象を活用したロコモーション生成機構がモジュラーロボットに実装された。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。このような完全に受動的な結合機構にもかかわらず、前節のシミュレーション結果が示すように、本モジュラーロボットは優れた環境適応性と拡張性を示す。また、紙面の都合上割愛したが、優れた耐故障性を示すことも確認している。このことは、振る舞い生成に対する制御系と機構系の寄与度の配分は、単なるゼロサムゲーム的な、あるいはパイの取り合い的なものではなく、機能創発に必須であることを本事例研究は強く示唆しており、森の唱える「全機のための一致」という思想と通じるものが感じられる [6]。

4.2 現場の悩みとおもしろさ

現時点では、「このように設計したらこんな興味深い振る舞いが出ました」という域をまったく出でず、移動知を考察するプラットフォームがなんとかできた段階に過ぎない。今後は、「なぜこのような振る舞いを創出できたのか？」という問いかけに対して説得力のある説明を与えることが不可欠である。実は、ここに領域 C に着目することの難しさが端的に表れていると思われる。構築するのはできて解析と説明がとて難しいのである（downhill invention and uphill analysis）。この点についてもう少しだけ考察してみよう。

領域 C で制御系と機構系を連関させるということは、制御系と機構系の両者に振る舞い生成においてそれぞれ相応の寄与をさせることを意味する。つまり、振る舞い生成における責任の所在が分散化しているの

である。従来の制御では、制御器がほぼ完全に振る舞い生成の責任を担っていたわけで、この意味では非常にわかりやすかつただろう。ところが問題はこれだけに留まらない。さらに説明を難しくしているのは、行動主体が環境とセットになって初めて意味を持つような設計が要請されることである。この点については、大須賀らの研究 [7] は大変示唆的である。大須賀らは、それまで現象論に過ぎなかった受動歩行に関してなぜ安定かを調べた結果、ポアンカレマップ内に陰伏的なフィードバック構造（implicit feedback structure）が存在することを見出した。この事例研究から学ぶべきことは以下の通りである。受動歩行機械は、位置エネルギーと運動エネルギー間の循環、そして脚の接地の際のエネルギー散逸は、移動しさえすれば「黙っていてもタダで手に入る」環境との相互作用力学である。大須賀らの研究の意義は、機構系（受動歩行機械なので制御系はない）を適切に設計すれば、黙っていてもタダで手に入る環境との相互作用力学を骨の髄まで活用するような力学系を行動主体と環境との間に持たせることができる、ということを示したことである。

したがって、筆者らのモジュラーロボットにおいても、移動しさえすれば黙っていてもタダで手に入る環境との相互作用力学を考えることから攻めていくことは重要であろう。ここで重要なことは、筆者らの事例研究では可変形態の行動主体を採り上げていることである。図 4 をあらためて見ていただきたい。モジュラーロボットの移動に伴って、特に障害物に対処する際に自発的なモジュール間の着脱が行われている点である。ここで、この着脱は機能性素材を介して行われているため、「自然で無理のない理にかなった変形」であることに注意されたい。これは、変幻自在の可変形態ロボットであるがゆえに現れる、移動すれば黙っていてもタダで手に入る環境との相互作用力学であろう。筆者らは現在、この観点からの考察を進めている。これまでの固定形態のロボットに加えて、このような可変形態のロボットに着目することで、新しい知見が得られることを期待している。

4.3 移動知理解のためのキーワード

最後に、依然として構想の域を出ていないが、移動知理解のためのキーワードを取って示してみたい。説明のしやすさを考慮して、以下、上位概念から下位概念へとキーワードを並べてみる⁵。

8 割原理 現段階で、最上位に据えるべきと考える概念がこれである。行動主体が無限定環境下で振る舞いを決定する際には、行動主体が具備する物理的・計算的資源が有限であるという制約に加えて、時間圧という厳しい制約も存在している。し

⁴ 大須賀らによって提唱された非線形振動子の引き込みによる歩行生成 [4] は、早くからこの領域の重要性に着目していたという点で高く評価できる研究である。

⁵ ここで紹介するキーワードの一部は、偶然手にした文献 [9] を参考にさせていただいた。時間に追われるながらも膨大な仕事を処理せざるを得ない、現代社会の厳しさから必要に迫られて生み出されたノウハウであるが、考えてみれば生物は、何億年もの永きにわたってまさにこれらを地で行くような生き方をしているのである。

たがって、このような制約下においては、パフォーマンスの最適化といったことはいずれも望んでならない（それこそ高望みである）。「そこそこ達成できたらよしとする」、換言すればまさに「足るを知る」ということが肝要となるだろう。「8割原理」とは、このような行動生成原理を表すために導入した用語である。8割という数値に意味があるのではなく、100%は無理というニュアンスを表しているに過ぎないことに注意されたい。矢野らが自律分散システムの制御方策として提唱した「最大多数の最小不満足則」は、早くからこの概念の具体的実装を試みていた点で特筆すべきことであろう [5]。ただし、パフォーマンスの指標をどのようなものにするのかに関しては、注意深い考察が必要である（一つの有力な候補としては、エネルギー効率が挙げられるだろうが、その妥当性については議論の余地がある）。

手抜きと集中 8割原理を実現するために必要となるのがこれである。振る舞い生成においては、積極的に「手抜き」をする必要がある。手抜きというと聞こえが悪いが、これは裏を返せば「必要なところに集中するため」である。資源の有限性と時間圧という厳しい制約が課される行動主体にとっては、不必要なところでは手を抜いて、本当に必要なところに持てる資源を投入するというのは、むしろ積極的に推奨されるべきことなのである。本稿で紹介したモジュラーロボットにおいては、機能性素材（ペルクロテープ）を活用した自発的着脱機構によって、どのモジュールとどのモジュールを着脱するかについての明示的な制御は一切行っていない。これが本事例研究に導入した「手抜き」である。これがあるからこそ制御系は、誘引刺激に向かって全体を合目的的に移動させることとコヒーレンシーの維持に「集中」するだけでよいのである。もし、モジュール間の着脱を逐一明示的に制御していたらどうなるかを考えてみれば容易に理解できるだろう。そう、制御アルゴリズムは劇的に複雑になり、意思決定に膨大な時間がかかってしまうのである。ただし、ゆめゆめ間違ったところで手抜きをしてはならない。「いつ・どこで手を抜き、集中するか」を適切に決定するメカニズムこそ、移動知発現の基盤になると筆者らは考えている。

かたい部分とやわらかい部分の絶妙な組み合わせ 手抜きと集中を効果的に実現するために、生物が進化過程という膨大な試行錯誤を通して手に入れたものがこれである。本稿で紹介した事例研究では、図5に示すように、「かたい部分＝制御系による振る舞い生成の拘束、やわらかい部分＝機構系の力学的特性に従った振る舞い生成」という図式に基づいている。この意味では、既存のダイナミクススペース制御の枠組みから抜け出したものとはなっていない。しかしながら、生物の身体内部では至る所（さまざまな階層）で「かたい部分」と

「やわらかい部分」が絶妙にかみ合わされていることを考えると、この概念は一考の価値があると思われる⁶。さらに重要なことは、「この組み合わせは時間的・空間的に変化」するということである。この点について、もう少し深く掘り下げてみたい。例えば、これまでの準受動歩行機械などは、あるタイミングで特定の関節を駆動するというパルスティック的な制御が行われていた。これは、時間的観点に基づく「かたい部分とやわらかい部分のかみ合わせ」に着目していると言えるだろう。一方、生物では、状況依存的に各関節の剛性を動的に変化させている。これは、「かたい部分とやわらかい部分のかみ合わせ」を空間的にも展開する必要性を示唆している。移動知の研究グループでは、鄭らが、「茶筌でお茶を点てる」と「石臼を引く」という動作を事例として採り上げながら、手首・肘・肩関節における剛性（筋緊張）調整のメカニズムを考察している [8]。この背後に存在する動力学のモデル化を通して、ダイナミクススペース制御の新しい展開のみならず、移動知の発現原理に関する有益な知見が得られると期待される。

5 まとめ

生存脳機能という行動主体が具備すべき最も普遍的かつ根元的な知の基盤の源を移動に求めるのが移動知である。そしてそれは、行動主体の能動的な動きに伴ってはじめて浮かび上がってくる知の形態でもある。本稿では、制御系と機構系の有機的連関をキーワードに、モジュラーロボットの形態制御を事例として採り上げながら、このような知を発現させるための設計原理を考察した。そして、制御系と機構系のそれぞれに振る舞い生成において相応の役割を持たすことで、実時間適応性や拡張性といった興味深い特性が現れるのを見てきた（図4参照）。

生存脳機能とは、端的に述べれば、環境が変動しても常時「そこそこ動く」ことを保証する知の形態である、ということになる。現在の人工物システムは、一般に想定環境に対して極度に最適化されており、稼働環境がそこから逸脱するやいなや、発現するパフォーマンスは劇的に劣化するというピーキーな特性を示す。「そこそこ動く」というと何とも間の抜けた表現に聞こえるかもしれないが、これこそ実世界で動き回る行動主体にとって最も重要な要請であり、同時にこれまで工学的に実現が最も困難であった（手強い）知の形態でもある。移動してはじめて発現する知の形態（移動知）が存在するという仮定を初動段階から共有することで、生物学と工学の真に有機的な連携が可能とな

⁶ 知能発現とは異なるが、発生過程は、このことが非常によくわかる事例となっている。発生過程では、遺伝子発現による発生的拘束（かたい部分＝遺伝的にきっちり決められているところ）と、細胞間接着性の違いを活用した細胞選別（やわらかい部分＝状況依存的なおまかせのところ）などのメカニズムが絶妙にかみ合わさって実現されている。

り、生存脳機能の発現原理とその工学的実現方策に関する理解が効果的に進むと期待している。

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。

参考文献

- [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:「創発現象を活用したモジュラーロボット－形態安定性および耐故障性検証に基づく実機デザイン－」, 第17回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.31-36 (2005)
- [3] 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)
- [4] 多賀巖太郎:「脳と身体の動的デザイン 運動・知覚の非線形力学と発達」, 金子書房 (2002)
- [5] 矢野雅文:「生物的自律分散システム的设计原理」, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.468-473 (1992)
- [6] 森政弘:「機械部品の幕の内弁当－ロボット博士の創造への扉－」, オーム社 (2003)
- [7] 杉本靖博, 大須賀公一:「受動的動歩行の安定性に関する一考察－ポアンカレマップの構造解釈からのアプローチ－」, システム制御情報学会論文集, Vol.18, No.7, pp.255-260 (2005)
- [8] X.-Z.Zheng, K. Fukushima, and K. Ito: "Task Skill Formation in Redundant Manipulator Systems", in Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.3295-3300 (1998)
- [9] 野口悠紀雄:「「超」勉強法・実践編」, 講談社 (2000)