

## 形態－機能の創出を想定した軟生機械システムの開発

西川孝二 横井浩史 嘉数侑昇  
北海道大学工学部

あらまし 我々は、生物が持つ、柔軟で多様な行動生成を行う能力に興味を持ち、これを人工物の中に実現することを目指している。ここでは、実際にそのような能力を進化的に獲得してきた生物システムに注目し、同様のシステムを内在させうる人工物として、「軟生機械システム」を提案する。軟生機械システムは、アクチュエータとオートマトンの組からなる集団で実現されたマルチエージェントシステムである。本稿では、ヒトデ型にエージェントを構成し、アクチュエータの初期配置及び数量を変えた場合に獲得される自律ロボットコントローラの挙動について考察を加える。

### A Development of Soft Mechanical System for Morpho-functional Emergence

Koji NISHIKAWA, Hiroshi YOKOI and Yukinori KAKAZU  
Faculty of Engineering, Hokkaido University

**Abstract:** We are interested in abilities of soft and various activities that animals have. We are aiming to realize the abilities in the mechanical system named "Soft Mechanical System." Soft Mechanical System is a multi-agent system composed a set of many actuators and controllers. In this paper, we describe study of simulations of the proposed system changing initial configuration and amount of actuators.

#### 1. はじめに

我々は、生物が持つ、柔軟で多様な行動生成を行う能力に興味を持ち、これを人工物の中に実現することを目指している。ここでは、実際にそのような能力を進化的に獲得してきた生物システムに注目し、同様のシステムを内在させうる人工物として、「軟生機械システム」を提案する。

機械をはじめとする人工物を設計することは、形状・構造やそれらが果たす機能を設計することである。しかしながら、人工物が果たすべき機能から形状・構造を決定することは、それほど容易ではない。従来の機械設計法では、形状・構造をあらかじめ全く指定しない場合には、いくら厳密な計算を行っても一意的に機械の形状・構造を決定することは不可能である[3]。そのため実際の設計作業は、要求機能から完成品の形状・構造を類推し試作品をつくる feed forward process, それが要求機能に合致したものであるか検証する feedback process, のサイクルを幾度か繰り返し進行していく。完成した人工物は、初期の要求機能を満足するが、想定外の機能を満足する可能性はほとんどない。一方、生物に目を向けるとそれぞれの種の形状・構造は様々であるが、どの種においても多くの機能を有し生活圏の中で生命を維持している。生物と人工物の違いは、人工物は設計サイクルの中で形状・構造及びそれが具備する機能が固定されていくのに対し、生物は、環境やリワードの状態に進化・学習を通して適応可能だということにある。

本稿では、形態が持つ変形能を高く設定し、その動

作による相互作用系ダイナミクスから合目的な機能が創出される過程を実現させることを目的とし、そのための例として、自由に身体形状を変化させる能力を持つ放射相称形状型のロボットを用いて、マルチエージェントシステムによる行動決定過程をシミュレートし、放射相称形状型ロボットにおける運動機能の創出に関して考察を加える。

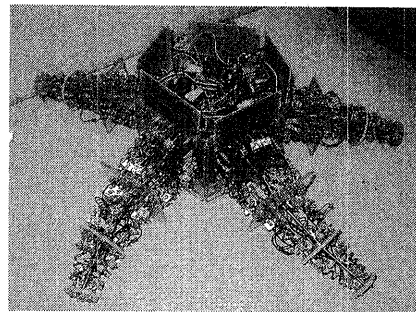


Figure 1: The Symmetric Body Robot

#### 2. 軟生機械システム

軟生機械システムは、アメーバなどの軟体動物が挟路においてみせる柔軟性の高い行動パターン（自在変形運動）を模倣して、自己組織的動作を生成可能なメカニカルシステムである。生物においては、動作及び意思決定の最小単位が細胞であるため、軟生機械シス

テムにおいては、一組のアクチュエータとコントローラをこれに見立てる。我々は、これまでに軟生機械システムの一具現化として、放射相称形状型ロボットを提案してきた (Figure 1) [1].

放射相称形状型ロボットは、棘皮動物の一種であるヒトデの形態[2]を模倣したロボットである。放射相称形状型ロボットの身体形状である五放射相称形状は、前後左右の区別がない。しばしば人間の手の持つ機能の多様性と対比されるように、「移動」、「物体の把持」といった行動生成の潜在的可能性を有する[3].

### 2.1 形状

放射相称形状型ロボットにおいては、無数のアクチュエータを全身に配置することによる近似的方法をとった。実際には、各腕をリンク機構で構成する。各リンクは、アクリル製のbody plateと鋼柱、ユニバーサルジョイントにより構成され、ジョイントの可動角は、約30°である。またリンクは、すべて相似形であり、これらは連結可能である。1本の腕は、2自由度の関節2つからなり、おのおの関節は、12本のSMA-coilアクチュエータにより動作する。全体では、120個のアクチュエータを用いており、形状変化の自由度は、60程度である。また、各腕の付根に独立した制御装置を配している。

## 3. マルチエージェントシステム

### 3.1 記述

放射相称形状型ロボットは、自らの身体形状を変化させることにより外界に作用することでタスクを遂行することを念頭に置いたロボットである。従って、行動制御は、各腕の屈曲の重ね合わせとして実現される。ここでは、実際のヒトデの神経構造を考慮にいれ[4]、各腕の行動制御を一つの自律エージェントで表し、それらの相互作用系にマルチエージェントシステムによる行動制御法を用いる。

各エージェントの記述は、以下の如く定式化される。

$$M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F) \text{-----} (1)$$

$$q_{i+1} = \delta(\text{sensor}, q_i) \text{-----} (2)$$

$$Q = (a, S) \text{-----} (3)$$

$$A = (a_i, C, \alpha) \quad (i = 0, \dots, 5) \text{-----} (4)$$

ここで、 $M$ は自律エージェントを記述する有限オートマトンであり、 $Q$ はエージェントの状態の有限集合、 $S$ はセンサー入力の有限集合、 $q_0$ 、 $F$ は $Q$ の要素の一つで、初期状態、終了状態をそれぞれ表す。 $\delta$ は、状態遷移関数であり、写像 $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ で定義される。また、 $Q$ は、行動 $a$ と内部状態 $S$ の二つの部分集合からなり、ロボットの行動は $A$ は、エージェント群の行動 $a$ とロボットの力学的拘束条件の集合 $C$ により写像 $\alpha: a \times C \rightarrow A$ で決定される。また、集合 $Q$ は、ロボットの形態およびアクチュエータの制御点数により決定さ

れ、集合 $S$ は、環境やロボット自身に対する観測系により決定される。また、終了状態 $F$ は、ロボットに課せられるタスクを表す。エージェントは、ターゲットの距離を測定するセンサー及び隣接エージェントと通信するためのポートを有し、各腕をアクチュエータとして行動を出力する。

### 3.2 コーディング

ここでは、エージェントの状態遷移関数 $d$ としてニューラルネットワークを用いた (Figure 2)。重み $W_{ij}$ は、{-1, 0, 1}の値をとる。入力は、距離センサーのセンサー値、左右のエージェントの活性値の3つを取り、出力は、式(5)で示される行動及び左右エージェントへの活性値である。

$$a = \begin{cases} \text{outputValue} > \theta : \text{swingArm clockwise} \\ -\theta \leq \text{outputValue} \leq \theta : \text{stop} \\ \text{outputValue} < -\theta : \text{swingArm counterclockwise} \end{cases} \text{-----} (5)$$

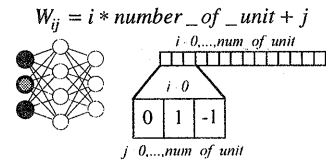


Figure 2. String coordination

### 4. 計算機シミュレーション

以下では、タスク指向の状態遷移関数の設計法としてリアクティブシステムを用い、状態遷移関数 $a$ の写像関係を後天的に獲得する手法として進化的計算手法[6]を用いた場合の放射相称形状型ロボットの挙動について計算機シミュレーションを行った。その際に、上述の相互作用系から行動が生成される過程を中心に考察を加える。

#### 4.1 設定

ここでは、簡単化のために各腕のリンク数を1つとし、その各々を一つのエージェントに割り当てる。各エージェントは、近接するエージェントの直前の行動および目標位置までの距離をセンサー入力とし、重心に対して上下左右の運動を出力とする。タスクとしては、Figure 3, 4に示す4種類の軌道上を移動する目標物の追跡問題を扱った。また、評価関数としては、式(6)に示すように、目標物が1周する間にロボットが行動した後の目標物とロボットの間の距離をそれぞれのエージェントに与える。また、エージェントの初期配置として、腕の数を3~7の5種類、ボディの形状を円と楕円の種類を用意した。

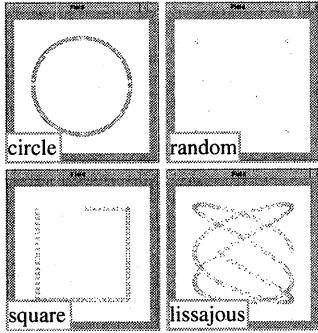


Figure 3: Target Trajectory

$$fitness = \sqrt{(G_x - O_x)^2 + (G_y - O_y)^2} \quad (6)$$

(Gx, Gy): ロボットの重心座標

(Ox, Oy): 目標物の座標

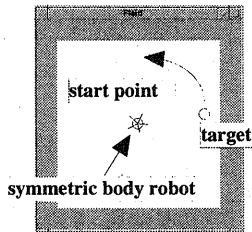


Figure 4: Simulation environment

#### 4.2 シミュレーション 1

ここでは、実機と同じ配置、すなわち、5本の腕を持ち、それらを円周上に配置した場合のシミュレーションについて示す。

エージェントの行動は、(0)無動作、腕を(1)反時計回り/(2)時計回りにふる、及び(3)ランダム出力である。その際の行動の写像、すなわち、aはGA (Genetic Algorithm)により探索した。Figure 5は、獲得されたaのうち特徴的なものを示す。centerは、一番強く光を受けている場合にエージェントがとる行動を表し、left/rightは、centerに対し相対的に左右にある状態での行動を表す。図の上段の行動を表す数字は、上述の各行動の添字に対応する。中段は、ロボットと目標物の軌跡を表す。下段は、各エージェントの出力の遷移を表し、右端で折返して表示している。また、色の薄い順番にエージェントの行動を割り当てている。

Figure 5に示したシステムの3種類の挙動は、GAの探索における初期段階から収束段階に至るまでの最良固体の試行を示している。探索の初期段階では、定常的にランダムを出力する(一番濃い色)エージェントがいるために、ロボットは、目標物を追跡できなくなっている。中盤に入ると部分的に収束し出すが、一斉にランダムを出力する場合に目標物を見失う様子が伺える。収束段階では、エージェントの出力がleft-1, right-2, center-0のように一定値に近付くことが分かる。しかしながら、ここでは扱わなかったが、

GAの評価は、スカラーであり評価関数が自明でない問題に際して十分な性能を発揮できないことがある。今後、そのような問題に取り組むことを課題とする。

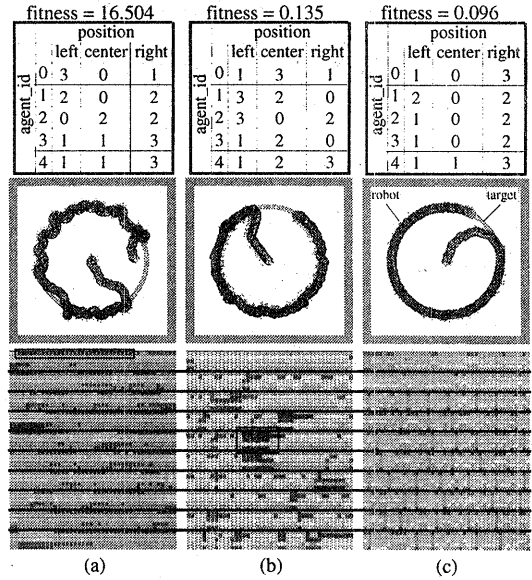


Figure 5: Simulation results

#### 4.3 シミュレーション 2

ここでは、4.1節で用意した10種類の初期配置について円周上を動く目標物の追跡シミュレーションの結果を示す。始めに各シミュレーションにおける、評価値の推移を表すグラフをFigure 7に示す。始めに図中のグラフの横軸は、Figure 6と同様にGAの指向回数 (trial) を示し、横軸は、評価値 (fitness) を示す。収束の度合いに違いはあるが、すべての場合において、ロボットは、目標物を補足していることが分かる。これにより、放射相称形状型ロボットを制御する際に提案したマルチエージェントシステムを用いることにより、エージェントの数量及び初期配置に関係なく合目的な状態遷移関数を獲得することができることが示された。

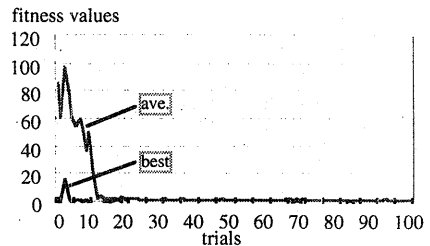
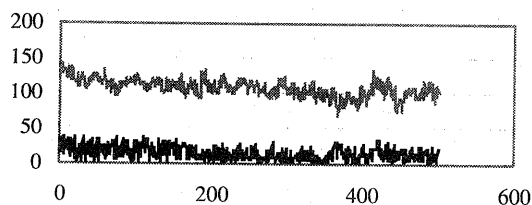
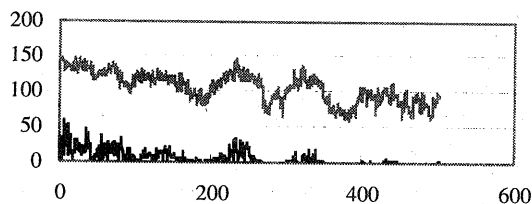


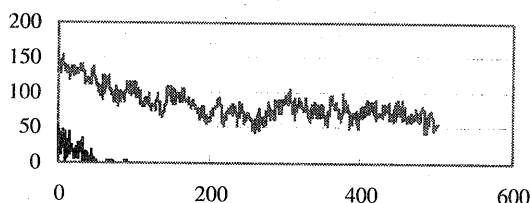
Figure 6: Transition of fitness value (1)



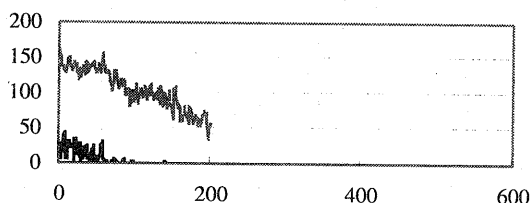
(a) 3 agent circle



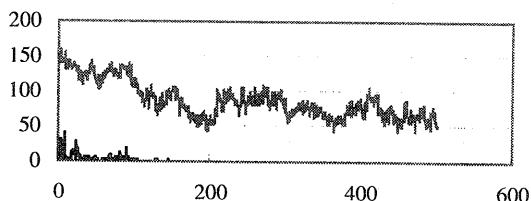
(c) 4 agent circle



(e) 5 agent circle



(g) 6 agent circle



(i) 7 agent circle

Figure 7: Transition of fitness value (2)

## 5. おわりに

最後に、本稿では、柔軟で多様な行動生成を行う能力運動機能の創出能力を実現するための制御方法の構築を目標とし、本稿では、特に、マルチエージェントシステムによる行動決定過程をシミュレートし、放射相称形状型ロボットにおける運動機能の創出に関して考察を加えた。結果的には、エージェントの数量、配置に関係なく合目的な状態遷移関数を得ることができた。

今後は、対故障性、制御則の簡化性を考慮し、動作の途中でエージェントの数を減少させること、歩行以外の動作と組み合わせたときのロボットの挙動、また、これらを実機で実験することが課題といえる。

## 参考文献

- [1] 西川孝二, 本堂直浩, 羽倉淳, 横井浩史, 嘉数侑昇; 放射相称形状型ロボットに関する研究-マルチエージェントプログラミングによる歩行動作の獲得-, 第十回自律分散システムシンポジウム資料, 神戸(1998).
- [2] Lynn Margulis, Karlene V. Schwartz; FIVE KINGDOMS -An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth-. 川島誠一郎, 根平邦人 訳; 図説・生物界ガイド 五つの王国, 日経サイエンス社(1987).
- [3] 梅谷陽二, 森政弘; 形態と機能. 日本機械学会誌, 第76巻, 第649号, pp. 14-20.
- [4] Ryji Suzuki, Ikuko Katuno and Keiichi Matano; Dynamics of "Neuron Ring". *Kybernetik, S. Bd., Heft 1*, (1971).
- [5] Stephan A. Wainwright; AXIS AND CIRCUMFERENCE: The Cylindrical Shape of Plants and Animals. HARVARD UNIVERSITY PRESS. 本川達雄訳; 生物の形とバイオメカニクス, 東海大学出版会(1989).
- [6] D. B. Fogel; Phenotypes, genotypes, and operators in evolutionary computation. Proceedings of the 1995 IEEE Conference on Evolutionary Computation, Perth, Australia, IEEE Press, pp. 193-198, (1995).
- [7] P. Stone, M. Veloso; Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning 1999.