

自己組織化モデルを用いた軟性機械制御系

高橋伸幸 横井浩史 嘉数侑昇

北海道大学

自由に変形し、柔軟で多様な行動生成する軟性は、まさに粘菌等の生物の特徴である。粘菌は同一の細胞の集合であり、特化した感覚、運動器官を持たないにもかかわらず、全体では統一された動きをする。本研究では、自己組織化モデルを採用することにより、複雑な運動パターンを少数の秩序パラメータによって制御できるようになる。本研究のマルチセルロボット制御系は、自己組織化モデルによって、セルユニットは局所的相互作用のみにもかかわらず、全体で統一された動きをすることが可能になる。特に、非線形振動子における引き込み等の自己組織化現象をモデル化し、計算機実験によりその有効性を示した。

Flexible Machine Control System using Self-organization Model

Nobuyuki TAKAHASHI, Hiroshi YOKOI and Yukinori KAKAZU

Hokkaido University

Flexible deformation and actions are the features of a creature such as an amoeba. The amoeba consists of many homogeneous cells, and it does not have any specialized sensitive organs or motile organs, however, in the whole, the amoeba does unified movement. In this study, by applying the self-organization model, it is able to control complicated motion pattern by a small number of the order parameter. The multi-cell robot in this study is the aggregation of a homogeneous cell unit, and by the self-organization model, it becomes possible for the cell unit to move together in the whole, in spite of only using local interaction. Especially, the self-organization phenomena such as the entrainment in the non-linear oscillators was modeled, and by the computer experiment, the effectiveness was shown.

1. はじめに

近年、軟性機械の実現を目指した研究が、色々な分野で行われるようになってきている¹⁾²⁾。軟性機械を実現するには、2つのアプローチがある。1つは物理的構造、あるいは素材というハードウェアを工夫することで実現する柔らかさであり、もう1つは制御アルゴリズムを工夫し、ソフトウェア的に柔らかさを実現する手法である。

しかし、やはり第一に、柔らかさには構成素材の持つ柔らかさという限界が存在するわけであり、ソフトウェアだけを工夫しても、実現できる機能には限界がある。軟性を有するロボットに、このようにハードウェアに依る、もって生まれた物理的限界は、それを制約する最大の要因であるといえる。本研究では、新しく自己組織化モデルを用いる手法を提案する。

2. 自己組織化モデルの必要性

軟性ロボットに限らず、ロボット制御に関して、遺伝的手法により制御則の獲得を試みる研究は多いが、一般的に、試行に時間を要するという問題がある³⁾。また、ロボットの構成や、環境が変化した場合には、再学習が必要になることが多い。

自然界の生物はダーウィンの進化論以降、生物

は突然変異と自然淘汰で形づくられてきたと考えられている。しかし、工学的な進化的手法を用いたロボットと、それら自然界の生物との違いは、試行回数や試行時間そして個体数の差だけとは、考えにくい。例えば、自然界に金属ロボットが自然発生しなかったのには、それなりの理由があると考えられる。

実際には、自然界で、生物を形づくるのは自然淘汰だけではない。連続的な進化には連続的な進化の適応度地形(図1-左)を必要とする。そして、そのような適応度地形の最も重要な源は、自己組織化原理の類のものであるといえる⁴⁾。

つまり、進化は自己組織化現象という土台の存在の上に成り立っている自然淘汰と捉えることが出来る。例えば生物には、遺伝子が2重螺旋を形づくることから始まり、化学振動反応の発生、同期現象、3次元構造の蛋白質の生成等と様々な自己組織化的現象が観察されており、どれが欠け

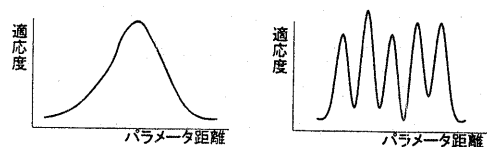


図1 適応度地形の例

でも生物は存在しない⁵⁾⁶⁾。しかし、既存の工学的遺伝的手法は、対象物の行動規則を得ることのみに着目しており、生物の持つ物質的性質、自己組織化現象的性質は全く考慮していないといえる。

ロボット制御の場合について、ロボットの構成や環境の変化は、制御に非常に大きな影響を与える。この時の遺伝的手法における適応地形は、図1-右のようなランダム性の高いものであるといえる。このような地形から解を探索するため、試行に時間を要し、パラメータの変化による影響も大きい。しかし、本研究ではここに自己組織化モデルを適用することによって、図1-左のようなパラメータの変化に対してなだらかな適応地形を形成できると考える。

3. マルチセルロボット

軟性機械に必要な柔軟性を示す例として、実環境において生存する生物が考えられる。本研究では特に、粘菌状の生物に着目し、以下のような特徴をもったマルチセルロボットとする。

- 1) 同一のセルユニットの集合からなる
- 2) 局所的相互作用のみで情報を伝達する
- 3) セルユニットの配置変更で全体の形を変えられることができる

このマルチセルロボットにおける制御系の構築を、自己組織化モデルを提案することによって目指す。

4. 生化学的粘菌の特徴

ここで参考にする粘菌は、粘菌変形体と呼ばれ、自励振動する細胞原形質の集合であり、形状変化や張力等が振動現象であることはよく調べられている^{7)~9)}。つまり、非常に多くの自励振動子から構成されている分散システムであるといえる。

粘菌は環境からの刺激を振動現象で捉えており、例えば誘引刺激では振動数が上昇する。同時に数ヶ所で振動数変化が起こった場合は、振動の引き込み現象により振動が全体で統合される。その引き込みの際の位相勾配が、全体での刺激情報になっていると考えられている。

5. マルチセルロボットの自己組織化モデル

粘菌のマイクロからマクロな自己組織化を参考にし、マルチセルロボットのために、3つの自己組織化モデルを作る。

始めに、セルユニット内での振動子の振動数の上昇をモデル化する。これは、粘菌において、誘引刺激を受けた時に振動数が上昇することと対応する。次に、セルユニット間での振動の引き込みをモデル化する。これは、粘菌における同期現象を用いた刺激情報の統合に相当する。最後に、セルユニット間での形態形成をモデル化する。これは粘菌における偽足の形成等の機能分化に相当する。

表1 マルチセルロボットのモデル

マルチセルロボット	粘菌の機能
1)自励振動子モデル	刺激のセンシング
2)局所的拡散結合モデル	刺激情報の統合
3)形態形成モデル	機能分化

7. 引き込みによる刺激情報の統合

7.1 各セルユニットの自励振動子モデル

粘菌での振動現象は、粘菌のような単純な生物でさえ無数の相関する化学反応から成り立っており、全てを記述することは困難である。

そこで、その化学振動を力学系のファンデルポール型の関数で記述する。

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

実際の粘菌の細胞は、誘引刺激を受けると振動数が上昇する。この刺激に対する振動数の増減を、変数 α を変化させることによって記述する。

図2は、式1において α の値のみを変化させた時のそれぞれの振動子の軌跡である。図の上が位相を示し、下がその時系列である。粘菌のモデルとしては、例えば、図2-IIが平常時の振動であるとすると、誘引刺激で振動数が上昇した時は図2-I、忌避刺激は図2-IIIで表すことができる。

表2 図2における初期値

Figure	α	β	x_0	x'_0
I	0.8	1.0	1.0	1.0
II	1.4	1.0	1.0	1.0
III	2.0	1.0	1.0	1.0

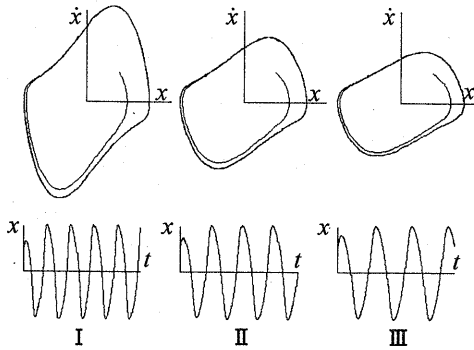


図2 α の異なるファンデアポール関数

7.2 セルユニット間の局所的結合モデル

振動子間に相互作用が存在する状態で、複数のリズムが相互干渉すると、互いに歩調をそろえようとする現象、引き込みが発生する。これは時間的パターンの自己組織化といえることができる。

$$x_{t+1}(i) = (1 - \varepsilon) x_t(i) + \varepsilon \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_t(j) - x_t(i) \right\}$$

ε : 結合強度 (2)

N: 番号 i のセルユニットの結合距離内にあるセルユニットの数

x : 式1の解

振動子結合系の方程式としては、Globally Coupled Map (GCM) や Coupled Map Lattice (CML) が有名である¹⁰⁾。これらと異なるところは、振動子の座標が固定ではなく、動的に変化すること、振動子間の結合関係や結合強度も動的に変化することである。

7.3 実験

上記のモデルに対して、計算機実験を行った。初期状態において、5個の振動子を等間隔に1列に配置した。左端 ($i=0$) の振動子のみが誘引刺激を受けて振動数が上昇すると設定する ($\alpha=1.0$ から $\alpha=0.7$ へ変更する)。つまり、1つの振動数の上昇に振動子群全体が引き込まれたときのアトラクタと、その時に生じる位相差を計算した。各振動子の初期位相はランダムである。

図2の上は5つの各振動子の位相変化の軌跡、下は横軸を時間軸にして、5つの振動子の時間変

化を重ねて示したものである。結合距離を1とし、それぞれが隣接する振動子と結合している。振動数が上昇した左端の振動子に、他の4つの振動子が引き込まれて、全体で位相勾配が生じている。

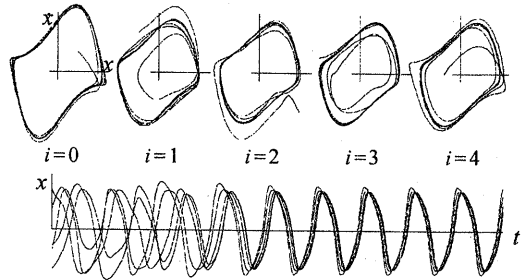


図3 振動子の引き込み

表3 図3における初期値

i	0	1	2	3	4
α	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0
β	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ε	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
N	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0

8. 拡散反応系による移動役割分化

8.1 セルユニット間の機能分化モデル

引き込みと同様に、ある細胞における状態をその細胞の周りの状態に向かって近づけようとする近距離の相互作用が拡散反応系である。もし仮に、単純に平均に向かうだけであるならば、状態は散逸し、全ての細胞は同じ状態になる。しかし、条件によっては自律的にマクロな構造が生み出されることがあり、これが形態形成である。

チューリングによれば“阻害物質の時間変化が活性化物質よりも遅く、阻害物質の拡散が活性化物質よりも速い条件”の場合に形態形成が起こる¹¹⁾。チューリングのモデルは、活性化と阻害に働く2種類のモルフォゲン (x, y) の細胞間の反応の拡散方程式であり、次の微分方程式を用いて表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= f(x, y) + D_x \nabla^2 x \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= g(x, y) + D_y \nabla^2 y \end{aligned} \quad (3)$$

本研究では、セルユニット間の機能分化をモデル化するのにこの形態形成が有用であると考え

る。実際の粘菌の細胞は単独では移動できず、近接する細胞との相互作用によって移動する。偽足の役割をする細胞は地面に密着し、その他の細胞が伸縮して座標を変える。このような細胞間の仕事の分担化は、マルチセルロボットに適用できると考える。

8.2 実験

今回は、 200×200 のセルオートマトンモデルを用いた。セルオートマトンで記述することにより、計算量が少なくなるという利点がある。初期状態でランダムであっても、図4のように白と黒の部分に分かれる。この場合は、セルユニットは2種類の機能のどちらかに分化することになる。

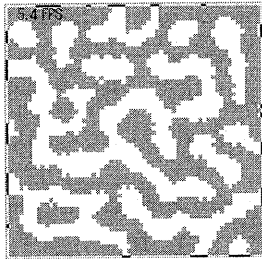


図4 機能分化のセルオートマトンモデル

9. おわりに

本研究では、軟性を持つ生物の一例として粘菌を工学的に参考にし、その自己組織化現象に着目して、自己組織化モデルの重要性を述べた。3つの自己組織化モデルを提案し、その計算機実験を行うことでモデルの有効性を示した。

本手法では、完全な局所的相互作用のみで全体としては統一された動作を行うという利点があるため、多数のユニットからなる物体の制御に有効である。さらに多くの自己組織化モデルを構築すること、実機のロボットにインプリメントする際に、相互作用やポテンシャル場をどのような媒体（通信チャンネルや磁場、音場等）を用いて、どのように記述するかがこれからの課題である。

参考文献

1) Yokoi, H., Yu, W. and Hakura, J.: Morpho-Functional Machine – Amoeba Like Robot based on Vibrating Potential Method, *Intelligent Autonomous Systems 5*, IOS Press, pp.542-549 (1998)

- 2) 村田智, 黒河治久, 小鍛冶子繁: 自己修復する機械-分散ユニット構成による自己組立, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.2, pp.254-262 (1995)
- 3) 高橋伸幸, 横井浩史, 嘉数侑昇: RNN を用いた形態形成振動子の基礎研究, 機械学会第 76 期全国大会講演論文集 (IV), pp.65-66 (1998)
- 4) カウフマン, S., 米沢富美子 (監訳): 自己組織化と進化の論理, 日本経済新聞社 (1999)
- 5) ニコリス, G., プリゴジン, I., 小島陽之助, 相沢洋二 (共訳): 散逸構造, 岩波書店 (1980)
- 6) Langton, C. G.: *Life at the Edge of Chaos, Artificial Life II*, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Vol. X., Addison-Wesley, pp.41-91 (1991)
- 7) 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, No408, pp.15-22 (1997)
- 8) Miyake, Y., Tabata, S., Murakami, H., Yano, M. and Shimizu, H.: Environment-Dependent Self-Organization of Positional Information Field in Chemotaxis of Physarum Plasmodium, *J. theor. Biol.*, Vol 178, pp.341-353 (1996)
- 9) 赤羽崇, 三宅美博, 山口陽子: 化学振動子-力学結合系としての粘菌の環境適応モデル, 第 11 回計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム, pp.83-88 (1999)
- 10) Kaneko, K.: Clustering, coding, switching, hierarchical ordering, and control in a network of chaotic elements, *PhysicaD* 41, pp.137-172 (1990)
- 11) Turing, A. M.: The chemical basis of morphogenesis, *Phil. Trans. Soc. R., London B237*, pp.37-72 (1952)