

ローカル接続を持つモジュールの自己組織化に関する研究

On the study of self-organization of locally communication of modules

中根 愛斗
Aito Nakane

ピトヨ ハルトノ
Pitoyo Hartono

公立ほこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University-Hakodate

The objective of this research is to investigate the Self-organization properties of the locally connected independent modules, especially in the context of the emergence of a coordinated swarm behaviors, and the application to hardware control including robotics. Relation between the behavior of the independent modules, and the swarm behavior is the focus of this investigation. Simulations using Starlogo are executed as the preliminary experiments. Based on the preliminary research, basic hardware modules are also developed and tested.

1. はじめに

ハードウェアシステムは、多様なモジュールの組み合わせにより構築される。ロボットを例に挙げると、モータ、アクチュエータやセンサ、電源や制御用計算機といった機能の異なる様々な構成要素(モジュール)が組み込まれており、それらが作用しあうことで動作を実現している。このような人工的なシステムを構築する場合、システム開発者はすべてのモジュールの特性を理解し、さらにモジュール間の相互作用を考慮したうえで、設計を行う。従来の設計方法では、一度完成されたシステムは、物理的な制約などにより故障時の自動修復や柔軟な拡張などは容易に行うことができない。

一方、自然界ではシステムを構成する単体が自己組織的に複雑なシステムを構築する例が数多く見られる。蛍の集団発光や、心臓のペースメーカー細胞の同期、雪の結晶の形成など一見複雑に見える構造や現象も、単体の単純な振る舞いによって、自己組織的に実現される。また、これらのシステムの多くは、部分的な故障に対し頑強であり、環境変化に対しても柔軟に対応することができる。

現在、人工的なシステム設計の問題を解決する手法として、自然界の自己組織化能力を模倣する研究が盛んに行われている。例えば、自然界の同期現象メカニズムを応用した、センサデータマイニングの手法が提案されている[宮野 2004]。また生物の歩行などの周期的な運動を制御する Central Pattern Generator が、ロボットの多関節制御へと応用されている [琴坂 2001]。

本研究は、複数の独立ハードウェアモジュールによる自己組織的なシステム創発の基礎理論の構築と応用を目的とする。本研究で扱うモジュールは、独立に計算資源、電源、センサやアクチュエータとローカルな通信機能を持つ。モジュール単体は、その機能や外形的な制約により限られた性能のみをもつものの、局所的な通信とそれによる個々の振る舞いの調整によって、自己組織的にマクロな振る舞いを創発することが可能となる。

本論文では、研究の初期段階として、振動子として振る舞うモジュール群を「結合振動子モデル」として扱い、モジュールの単体的な周期的な振る舞いや結合形態、モジュール間の情報伝達と、群としての振る舞いとの関係について述べる。次にそれ

らに基づいてハードウェアモジュールを構築し、自己組織的に集団としてマクロ的な動作を生成できるシステムの開発について説明する。

2. 結合振動子モデル

本研究では、開発するハードウェアモジュールを Fig.1 に示す振動子として扱う。一つのモジュールは近傍にある他のモジュールと相互結合することにより、振動子系を形成する。モジュール i 単体の内部状態として位相角 θ_i を用いる。この内部状態は、固有定角速度 ω_i で周期的に変化し、 $2\pi/\omega_i$ が動作周期である。モジュール間の相互作用により、振動子の角速度を瞬時的に変化させることで、動作周期が変化し、モジュール群のマクロ的な振る舞いも変化する。

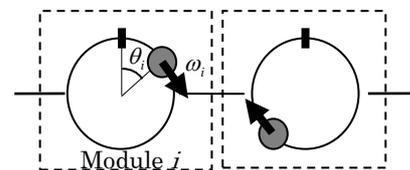


Fig.1 結合振動子モデル

2.1 パルス結合

本研究ではモジュール間の結合形態として、パルス結合を採用した。ここでは、モジュールの位相角 θ_i が 2π となった瞬間にのみ、結合する他のモジュールへパルスを発する。この振る舞いは式(1)に示す。

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{\infty} W_{ij} \delta(T_{j,k} - t) \quad (1)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } t = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} w_{ij}(\theta_i) & \text{if } i \text{ is connected to } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで n はモジュールの数を示し、 $T_{j,k}$ はモジュール i と結合したモジュール j の位相角が k 回目 $\theta_j = 2\pi$ となる時刻である。また、モジュール i 、 j は結合係数 $W_{ij} = w_{ij}(\theta_j)$ で結合している。これは、時刻 $t = T_{j,k}$ にモジュール j が出力したパルスを受信したモジュール i の、瞬間的な θ_i の変化量を決定する。本研究で

は2つの結合係数関数 $w_{ij}(\theta_i)$ を用いて、モジュール群のマクロ的な振る舞いを調べ、ハードウェアに実装する。

(1) 内部ポテンシャル型結合

本研究で用いる結合係数関数の一つを式(4)に示す。この結合係数関数では、式(5)に示す内部ポテンシャル $f(\theta_i)$ により、 θ_i が大きいほど、結合係数も大きい値となる。

$$w_{ij}(\theta_i) = \begin{cases} 2\pi - 2\pi\sqrt{1 - (f(\theta_i) + \varepsilon)^2} - \theta_i & \text{for } f(\theta_i) + \varepsilon \leq 1 \\ 2\pi - \theta_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$f(\theta_i) = \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi - \theta_i}{2\pi}\right)^2} \quad (5)$$

ここで ε は、モジュール間のパルスの強度である。式(4)で示す結合関数は、内部状態の値に関わらず、他のモジュールからパルスを受ける場合、内部ポテンシャルの上昇が常に ε であることを保障する。

2つの結合するモジュール i, j の振る舞いを Fig.2 に示す。モジュールがパルスを受信しないとき、その内部ポテンシャル曲線は周期 2π の周期関数となる。内部状態の変化に伴い、内部ポテンシャルが上昇し、 $\theta_i = 2\pi$ でモジュール i のポテンシャルが最大値に達すると、モジュール j へパルス信号を出力し、ポテンシャルと内部状態をゼロに戻す。

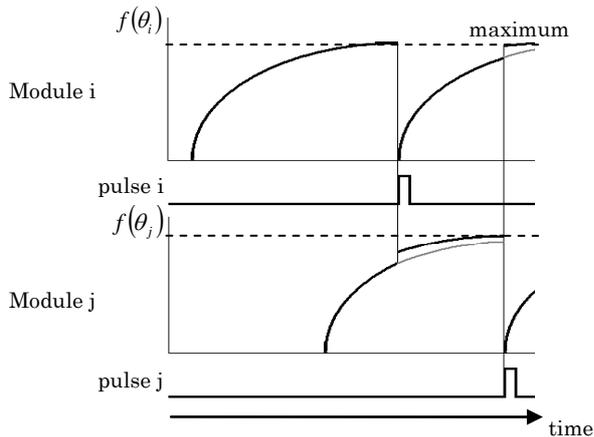


Fig.2 内部ポテンシャルによるモジュール間の結合

(2) 位相反応曲線型結合

モジュールの相互作用として位相反応曲線を用い、進行波状態を応用した自己組織的な通信機構の実現が試みられている[谷口 2006]。位相反応曲線とは、パルスを観測した時の位相と、そのときの位相変位との関係を表したものである。位相反応曲線の例を Fig.3 に示す。もう一つの結合係数関数 $w_{ij}(\theta_i)$ として式(6)に示す位相反応曲線を用いる。

$$w_{ij}(\theta_i) = -\varepsilon \sin(\theta_i - \phi) \quad (6)$$

ここで ε は結合強度、 ϕ は経験的に決定する定数である。

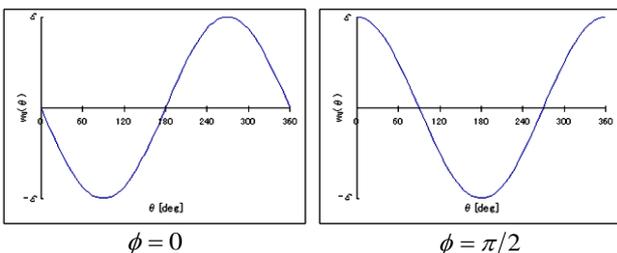


Fig.3 位相反応曲線

3. シミュレーションによる振動子モデルの評価

研究の初期段階として Starlogo[Resnick 1996]を用いて、2つの結合振動子モデルによるマクロ的な振る舞いの生成のシミュレーション実験を行った。

ここでは、初期内部状態の異なる4つのモジュールで構成されるシステムにおいて、結合形態やパラメタと、群のマクロ的な振る舞いとの関係性を調べた。

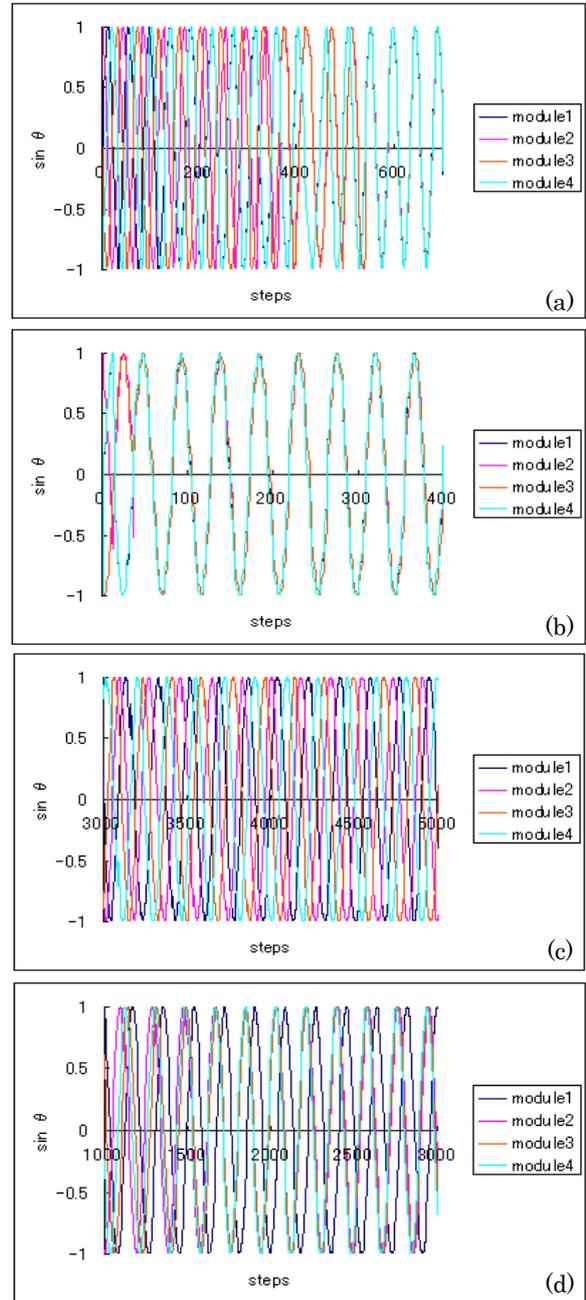


Fig.4 モジュール群のマクロ的振る舞い

3.1 内部ポテンシャル型結合の実験

Fig.4(a), (b)に結合強度 ε の異なる2つの群の各モジュールの内部状態の変位を示す。各エージェントは、他の3台のモジュールすべてと等しく結合している。

Fig.4(a)は結合強度 $\varepsilon = 0.01$ の群の振る舞いを表す。各モジュールは異なる内部状態から動作を開始する。モジュール間の

相互作用により徐々に内部状態が変化していく。そして 600 ステップではすべてのモジュールの内部状態が等しくなり、群全体で動作周期が同期する様子が確認された。また Fig.4-(b)は、 $\epsilon = 0.05$ としたときの振る舞いを表している。 $\epsilon = 0.01$ のときと比較して、200 ステップと早い段階で、モジュール群に周期的な振る舞いが発現した。また、その振る舞いでは結合しているモジュール間の内部状態には一定の位相差が存在した。

これらのことから、内部ポテンシャルを用いた相互作用を持つ結合振動子モデルでは、結合強度 ϵ によって群のマクロ的な振る舞いを変化させることが可能であることが示唆された。

3.2 位相反応曲線型結合の実験

位相反応曲線を相互作用に用いた場合、さらに顕著に群の振る舞いに変化が現れた。Fig.4-(c), (d)に $\epsilon = 10$, $\phi = \pi/2$ としたときのモジュール間の結合状態が異なる場合のモジュール群の内部状態の変位を示す。

今回用いた位相反応曲線の場合、 ϵ はマクロ的な振る舞いに周期的なパターンが発現するまでの時間に影響し、値が大きいほど早く周期的な振る舞いが現れた。また ϕ は安定時のモジュール間の位相差に影響するパラメタであり、 $\phi = 0$ のときモジュールは動作周期が同期する。また $\phi = \pi$ とすると、結合しているモジュール間の位相差 π を保ちながら、周期的な群の振る舞いが現れる。さらに、Fig.4(c), (d)に示すように、結合形態によってもマクロ的な振る舞いに変化する様子が確認された。

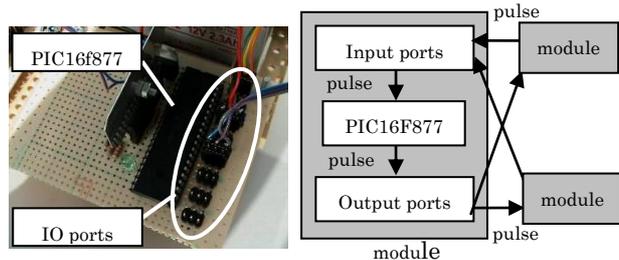


Fig.5 ハードウェアモジュール

4. ハードウェアモジュールとシステム開発

シミュレーション実験により、結合振動子モデルを適用することで、モジュール群のマクロな振る舞いが自己組織的に生成されることが確認された。そこで、実世界でも結合振動子モデルを適用したモジュール群のマクロ的な振る舞いが自己組織的に実現されることを確かめるために、テスト用のハードウェアモジュールを開発し、単純なタスクを実行するシステム開発を行った。

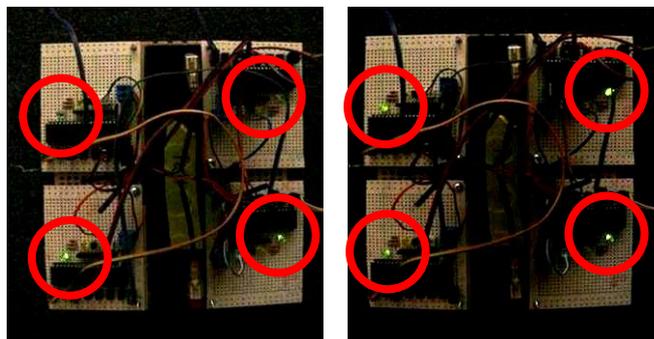
本研究で作成したハードウェアモジュールの概要と概観を Fig.5 に示す。モジュールは計算資源として PIC マイコンを搭載し、これによりモジュール単体の振動子としての振る舞いを制御する。また、モジュール間の結合は、通信ケーブルを用いた有線通信によって実現する。

ここでは、各モジュールが内部状態に基づいてLEDの発光タイミングの制御を行い、群としての発光パターンを自己組織的に生成するタスクを実現するシステムを用い、提案手法が実世界でも有効であることを確認する。また、モジュール間の結合は、内部ポテンシャルによって結合するパルス結合振動子モデルを適用した。

実験の初期段階では、各モジュールの初期内部状態が異なるため、それぞれのモジュールは異なるタイミングで LED を発光させる(Fig.6-(a))。しかし、時間が経つとモジュール間の通信により個々の振る舞いを調整することで、LED の発光周期が同

期していく様子が確認された(Fig.6-(b))。これは、シミュレーション上で見られた、結合強度 $\epsilon = 0.01$ でモジュールの内部状態が同期する現象と同様の状況がハードウェア上でも実現されたことを示している。

また、結合強度 $\epsilon = 0.05$ の場合にシミュレーション上で観測された、モジュール間に位相差が存在する状態でのモジュール群の周期動作も確認でき、結合振動子モデルによるモジュール群のマクロ的な動作の自己組織的な生成が、実世界でも実現可能であることが示唆された。



(a) 実験初期 (b) 動作周期の同期

Fig.6 LED 発光

5. おわりに

独立ハードウェアモジュールの自己組織的なシステム創発の基礎理論の構築と応用の初期段階として、結合振動子モデルをモジュールに適用する手法を提案した。シミュレーションやハードウェアでの実験を通し、結合振動子モデルによるモジュール群のマクロ的な振る舞い生成が自己組織的に実現され、また LED の発光タイミングの調整などの単純なタスクを実現できた。今後は、結合振動子モデルに関して、ハードウェアでの実験や数学的なアプローチによってマクロ的な振る舞いの詳細を明らかにすると共に、ハードウェアモジュールによって実現される具体的なシステムの検討、ならびにシステムの構築を行っていく。

参考文献

[宮野 2004] 宮野, 安部, 杉山: 集団同期のネットワークセンシングへの応用; IEICE technical report, Vol.104, No.471, pp.41-43, 2004.
 [琴坂 2001] 琴坂, Stefan, S.: 神経振動子を用いたロボットのリズム的な運動生成; 日本ロボット学会誌 Vol.19 No.1 pp.116-123, 2001.
 [谷口 2006] 谷口, 若宮, 村田: パルス結合振動子モデルにおける進行波状態を応用したセンサネットワークのための自己組織型通信機構; IEICE technical report, Vol.106, No.167, pp.17-20, 2006.
 [Resnick 1996] Mitchel, R.: StarLogo: an environment for decentralized modeling and decentralized thinking; Conference companion on Human factors in computing systems: common ground, p.11-12, April 13-18, 1996.