

知的マルチエージェントの自己言及と創発性

—人間が参加できる開かれた人工システムへ向けて—

東工大・総合理工・知能システム科学 三宅美博

Self-reference and Emergence in Multi Agent System

---Toward the open system which allows human participation---

Yoshihiro MIYAKE, Tokyo Inst. Tech.

Abstract: Self-reference-based emergence in multi agent system is proposed. As an example, open communication system between human and multi-robot system is constructed by using mutual entrainment.

1. はじめに

創発システム実現へのアプローチには様々な方法があると思われるが、ここでは生物システムに見られる自己言及性をベースにした知的マルチエージェントシステム構築に関する著者の研究例を紹介する。

生物における知能の創発性を考えるとき最初に驚くことは、生物は全くはじめての状況におかれても、それが自分にとってどのような意味を持つのかを発見し、それなりに適切な行動を取ることができることである。これは一見あたりまえのことに思われるが少し考えてみると極めて不思議なことである。なぜならば、その生物を取り巻く環境は明らかにその生物自身より遥かに大きい自由度を持つものとして現出するからである。では、このようなあらかじめ予測することのできない状況に対応するために、生物システムはどのような戦略を取っているのであろうか？

創発の問題とはこの類の問題であると私は考えている。ただし、予測できないということを確認的操作が可能領域で考察している限り、探索的な知能しかありえないことは自明であろう。なぜなら、起こりうる事象やそれらの組み合わせとしての母集団をあらかじめ定義してしまうことが、探索の範囲を事前に限定してしまうからである。では、われわれはどうかすれば創発的知能の領域に到達できるのであろうか？ここにこそ予測できないということの意味を深く考察する必要がある。偶然に内包されている創造への契機に気付く必要がある。確率論を越えた偶然こそ、つまり、われわれにとって事象を定義する以前の意味づけられていない無限定状態こそ、本質的な意味での偶然であり予測できない状況である。ここにこそ私が自己言及性を考えたい根拠があり、創発的世界への飛躍がある。

では、このような意味での予測できない状況を前にした時、なぜ自己言及が有効なのであろう？確率における事象を定義することは、その定義しようとするシステムと定義される環境を分離し、システムから独立に事象が規定できることが前提されている。これは環境を切り離すことによって生じる情報の欠如を積極的に利用していることになる。そして、そうであるがゆえに事後的にしか予測できない。しかし、われわれが生き活動している世界は決してそのような孤立した世界ではない。われわれは身体を持つがゆえに環境と不可分なインタラクティブな関係になるのである。ここに行為つまり身体性に基づく創発への可能性がある。つまり、システムが環境に積極的に関わり参加することによって「場」を生成し、その「場」の情報を自己言及的にシステム自身の視点から解釈することによって、複雑な状況のもとにおける自他の関係性が予測可能になるのである。

結論からいうと、生物システムは自己言及を通して必要な情報をリアルタイムに自己生成していると考えることができる。いいかえれば、あらかじめ起こり得る事象を分類し明示的に規定した上でシステムの機能を設計するのではなく、状況に応じてシステム自身が自己設計するのである。そして、そのメカニズムとして、システムと環境の相互引き込みを通して両者の不可分な関係の秩序としての「場」を自己組織し、それに基づいてシステムの在り方がシステム自身の視点から自己規定されることが実験的にも明らか

になってきた。そこで本発表では、このような自己言及性を利用することによって、知的マルチエージェントシステムにおける創発性、具体的には、状況依存的な機能分散が実現されることを示そうと思う。特に、身体性をもつ知的エージェントとしてロボットという表現に注目し、人間という予測できない環境とのコーペレーションの可能性について検討する。

2. 自己言及に基づく創発的設計

これまでの知的人工システムにおいて用いられてきた設計方法は以下のようにまとめられるだろう。それは、まず最初に、設計者がシステムと環境を分離した上で、環境のとりうる状態とシステムの応答に関する事象の集合を規定する。そして、次に、それらの間での写像関係を規定するアルゴリズムあるいはモデルを導入し、さらにそれを評価する測度を規定することによって明示的にシステムの機能を構築するのである。しかし、このような方法では人工システムを取り巻く環境が複雑化するにつれ、システムが際限なく肥大化しブラックボックス化することが避けられず、しかも、あらかじめ規定されていない環境には対応できないという原理的限界も生じさせてしまう。

一方、生物は、予測できない環境の中でも自律的に生きていくことができる。これは先にも説明したように、システムと環境の間で「場」を自己組織することを通して、システム自身の在り方をシステム自身の視点から自己言及的に自己規定することが可能になるからである。そして、著者は、実際の生物システムからそのような自己言及に関する基本的構造を学ぶことからスタートした。そして、粘菌 (*Physarum*) というアメーバ状生物の走化性における環境適応的な形態形成をモデル系として用いた。粘菌では、その一部分に餌を与えると、それまでの進行方向が変化し、それに伴って形態も再構築される。つまり個体の各部分の機能はあらかじめ固定されておらず、しかも、その部分だけで規定されるのではなく、それらの相互関係に応じて限定されるのである。しかも、どの位置にどの様に刺激が与えられるか前もって予測できないことを考慮すると、粘菌を構成する各サブシステムは自分を規定するための情報をリアルタイムに自己生成しているとしか考えられない。

そこで、このプロセスを実験的に解析した結果、Fig.10のようなメカニズムが明らかになった(1-3)。この生物はサブシステム群から構成され、各サブシステムは機能表現の無限定性を持つ感覚運動系と、それを限定するための拘束条件を生成するコンテクスト系をもつ。このとき、感覚運動系はリズム的性質をもち、隣接する同様の系との間の相互引き込みを通してシステム全体としてのグローバルなコヒーレント状態を自己組織する。これはサブシステムのもつ一種の身体性に対応する。そして、これを外部場と呼ぶことにする。さらに、その外部場の時空間的秩序が、各サブシステムのコンテクスト系によってそれぞれの位置に応じて解釈され、その内部に位相勾配(位相の空間微分)としての内部場を生成する。これは各サブシステムのシステム全体の中での相対的な位置関係を表現しており、各サブシステムの中にそれ以外のサブシステムとの相互関係が映されていることになる。そして、その内部場に基づいてサ

ブシステムごとに拘束条件が生成され、外部場を構成する感覚運動系の機能表現が限定される。このように外部場と内部場という2中心間での自己言及ダイナミクスを通してサブシステムが相互に多様化し協調的に機能分散することで、結果的に個体全体としての機能が創発されることが示された。そこで以下では、このメカニズムを用いることにより、マルチロボットシステムにおける機能分散とそのプロセスへの人間の参加を実現する。

3. マルチロボットにおける

創発的機能分散と人間の参加

このモデルでは、Fig.2のように、歩行ロボット集団におけるその相対位置に応じたグループ編成としての機能分散の実現を試みた(4)。そして、身体性をもつ知的エージェントとしてロボットに注目し、個々のロボットを上記モデルのサブシステムに対応させた。このとき、各ロボットシステムは2層からなり、一つは多様な歩行パターンを生成するロボット本体としての感覚運動系であり、それは隣接するロボットの歩行リズムとの相互引き込みを通して外部場を自己組織する。もう一方は、その外部場を解釈して拘束条件を生成し歩行パターンの無限定性を限定するコンテキスト系である。このとき、各ロボットは直接的には隣接するロボットとしか相互作用しないため、それだけでは歩行パターンをどのように限定すればよいか分からない。しかし、歩行リズムの相互引き込みを通してグローバルな外部場が自己組織され、それを個々のロボットのコンテキスト系が解釈し内部場を生成することで、それぞれの相対位置に応じた適切な歩行パターンが限定されグループ編成が可能になるのである。

個々のロボットの感覚運動系としては、多足の2足歩行モデルを用いている(5)。これは、神経系と筋骨格系の間での循環的相互作用を通して多様な歩行パターンを自己組織できるモデルであり、拘束条件としての神経系への定常入力に依存して歩行パターンが限定される。また、この歩行リズムの相互引き込みを通してグローバルかつコヒーレントな運動パターンとしての外部場が生成される。隣り合っただけで人と歩いたときに歩行リズムが自然と同調した経験をもつ人は多いと思われるが、それに対応した現象である。具体的には、ロボットの足の接地タイミングをパルス信号として、隣接ロボットの対応した神経系に入力している。これは足音を媒介とした身体的相互作用の一種とみなすことが可能である。

一方、個々のロボットのコンテキスト系では、隣接するロボットとの足の接地タイミングの時間差を位相勾配とみなし解釈することによって内部場を生成させた。その結果、その大きさは隊列の先頭からの空間的距離に対応して直線的に変化していることが明らかになった。したがって、個々のロボットにおいて解釈される位相勾配は、粘菌の場合と同様、ロボット間の相対的位置関係を示す情報を表現していると考えることが可能である。そこで各ロボットでは、これに基づいて神経系への定常入力としての拘束条件を生成し、歩行パターン、特に歩幅を自己限定することによって、ロボット相互の距離が調節されグループ編成としての機能分散が実現されることになる。この詳細に関しては、文献を参照していただきたい。

さらに、人間を参加させるためにはロボットのシミュレーションをリアルタイムで行なう必要がある。そこでFig.3のようにWSを複数台用い、それぞれを1台ずつのロボットに対応させることでリアルタイム化を実現した。具体的には、人間を先頭にして4台のロボットが1次元の隊列を形成する状況を設定した。さらに、人間の歩行運動における足の接地タイミングを靴の裏に装着したセンサーにより検出し、電気信号に変換しWSに無線で送信しロボットモデルの神経系に入力した。一方、WS中のロボットの歩行運動における足の接地タイミングを検出し、それを音として合成し、人間側へ無線で送信しヘッドフォンを通して聞

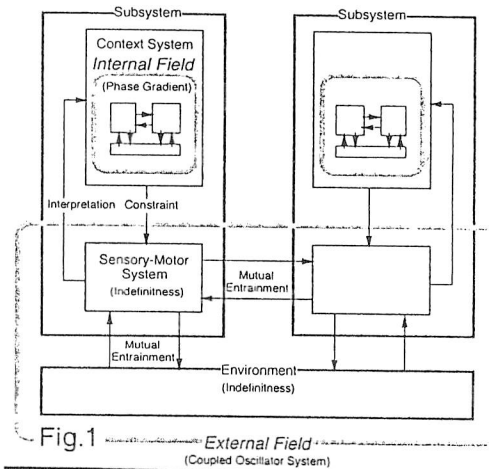


Fig.1

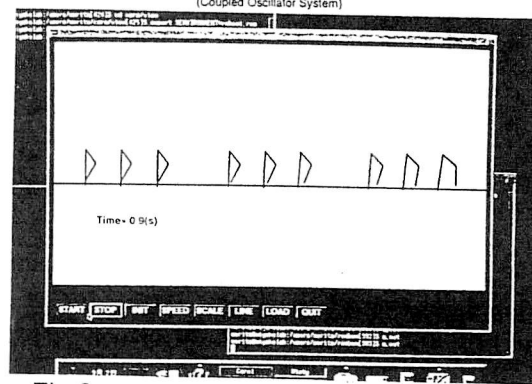


Fig.2

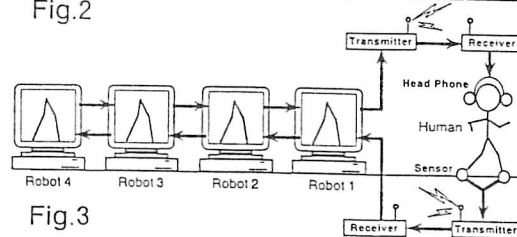


Fig.3

かせた。このような実験システムを用いることで、人間は仮想空間中のマルチロボットシステムと歩行リズムを介した相互作用をすることが可能になる(6-7)。これらの結果については、会場で詳細に説明する予定である。

参考文献

- [1] Y. Miyake, Y. Yamaguchi, M. Yano and H. Shimizu (1993), Environment-dependent self-organization of positional information in coupled nonlinear oscillator system, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E76-A, pp. 780-785.
- [2] Y. Miyake, S. Tabata, H. Murakami, M. Yano and H. Shimizu (1996), Environment-dependent self-organization of positional information field in chemotaxis of Physarum plasmodium, J. Theor. Biol., 178, pp. 341-353.
- [3] 三宅美博 (1996), 位置情報「場」と生命的自律性---粘菌の定性における環境適応的パターン形成, 数理科学, No. 394, pp. 56-63.
- [4] Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi and H. Shimizu (1994), Mutual-entrainment-based communication field in distributed autonomous robotic system. In: Distributed autonomous robotic systems (Asama H., eds), Springer-Verlag, pp. 310-321.
- [5] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu (1991), Self-organization control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment, Biol. Cybern., vol. 65, pp. 147-159.
- [6] Y. Miyake and H. Shimizu (1994), Mutual entrainment based human-robot communication field, Proc. of 3rd. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, Nagoya, Japan, pp. 118-123.
- [7] 三宅美博 (1995), ALは工学の新しいパラダイムとなりうるか?, 人工生命研究の課題と展望に関するワークショップ記録, 情報処理開発協会, pp. 79-109.