

知的マルチエージェントの機能分散と自己言及

み やけ よし ひろ*
三 宅 美 博*

1. はじめに

創発システム実現へのアプローチにはさまざまな方法があると思われるが、ここでは生物システムにみ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事例を紹介する。

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、生物はまった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もつのかを発見し、それなりに適切な行動をと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のようと思われるが少し考えてみるときわめて不思議なことである。なぜならば、その生物をとりまく環境は明らかにその生物自身よりはるかに大きい自由度をもつため、生物の側からすれば環境は本質的に予測できない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とっているのだろうか？

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率的操作が可能領域で考察しているかぎり、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合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、われわれはどうすれば創発的知能の領域に到達できるのだろうか？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。確率論をこえた偶然こそ、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とき、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とされている。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システムが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。われわれは身体をもつがゆえに、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かかわり参加することによって身体的コヒーレンスを生成し、それを「場」の情報として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、生物システムはこのような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、あらかじめ起こりうる事象を分類し明示的に規定したうえ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性としての「場」を自己生成し、それに基づいてシステムのあり方が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、本レポートでは、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、予測できない状況下での機能分散や相互補償が柔軟に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することにする。

* 東京工業大学大学院 横浜市緑区長津田町 4259

E-mail: miyake@ssie.titech.ac.jp

キーワード：自己言及 (self-reference), 多様性 (diversity), 創発性 (emergence), 「場」("ba"), マルチエージェントシステム (multi agent system).

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うえで、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、つぎに、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とりま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さげられず、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。たとえば、自然言語の自動翻訳システムでは、9割以上の例外処理を導入しても正答率は9割程度であるとさえいわれている。

一方、生物は、予測できない環境のなか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、システムと環境の不可分な関係としての「場」を自己生成することを通して、システム自身のあり方をシステム自身の視点から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、図1に示す粘菌(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(図中の矢印)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、どの位置にどのように刺激が与えられるかまえ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はしか考えられない。

そこで、このプロセスを実験的に解析した結果、図2のようなメカニズムが明らかになった^{1)~4)}。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もつ感覚運動系と、それを限定するための拘束条件を生成するコンテキスト系をもつ。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で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

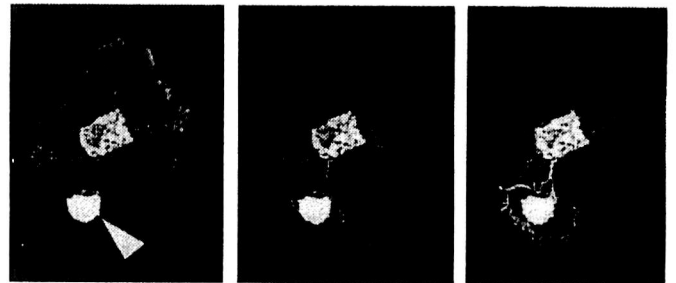


図1 粘菌の走性

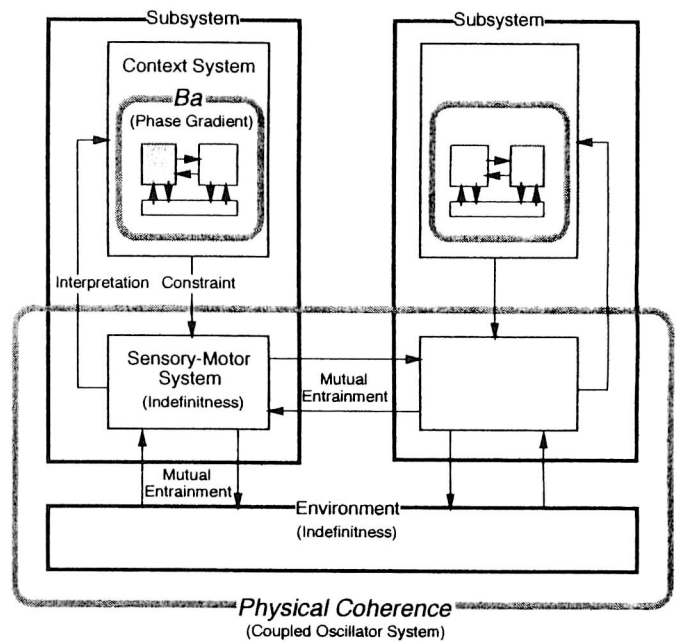


図2 自己言及モデル

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、これを身体的コヒーレンスと呼ぶことにする。さらに、その時空間的秩序が、各サブシステムのコンテキ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「場」を生成する。これは各サブシステムのシステム全体のなかでの相対的な位置関係を表現しており、各サブシステムのなかにそれ以外のサブシステムとの空間的相互関係が映されていることになる。そして、その「場」に基づいてサブシステムごとに拘束条件が生成され、感覚運動系の機能表現が限定される。このように身体的コヒーレンスを生成する感覚運動系と「場」を生成するコンテキスト系という論理レベルの異なる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、知的マルチエージェントシステムの創発性の一例として、マルチロボットシステムにお

ける機能分散に関して説明する。

3. マルチロボットシステムにおける機能分散と相互補償

このモデルでは、図3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^{5),6)}。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、1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身体的コヒーレンスを自己組織する。もう一方は、それ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身体的コヒーレンスが自己組織され、それを個々のロボットのコンテキスト系が解釈し内部に「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、多賀の2足歩行モデルを用いている⁷⁾。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な運動パターンとしての身体的コヒーレンスが生成される。隣り合って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。このような条件下で自己組織される身体的コヒーレンスの一例を図4(a)に示す。

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その内部に「場」を生成させた。その結果、図4(b)のように、その大きさは隊列の先頭(図中の左端)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

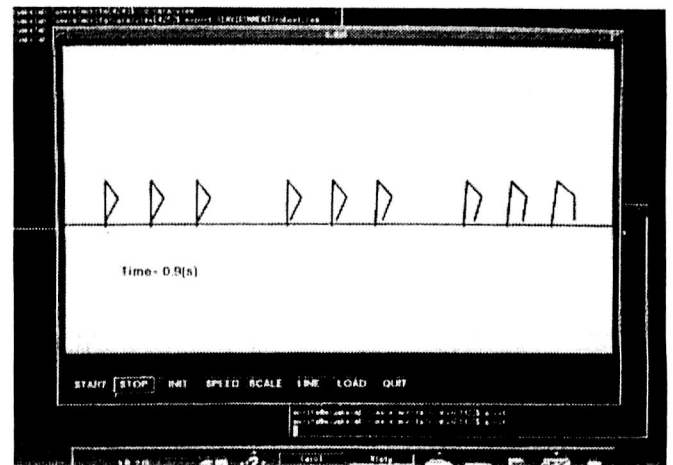


図3 マルチロボットシステム

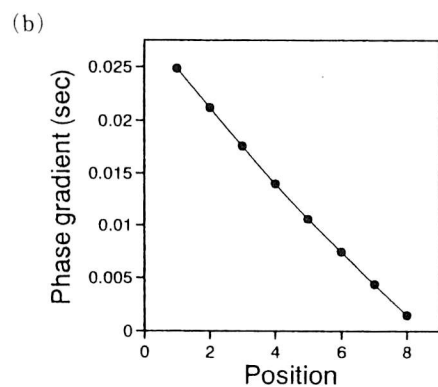
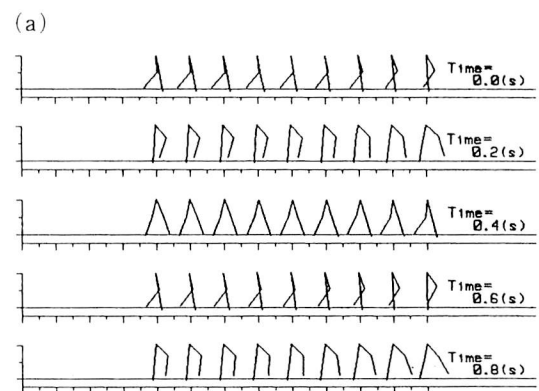


図4 身体的コヒーレンスと「場」

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。

このような自己言及に基づく創発的設計は予測できない環境下で特に有効と考えられる。そこで、9体のロ

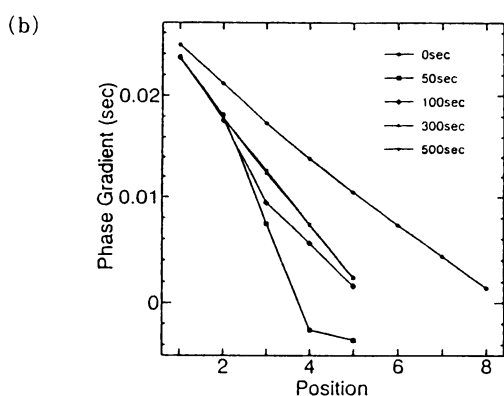
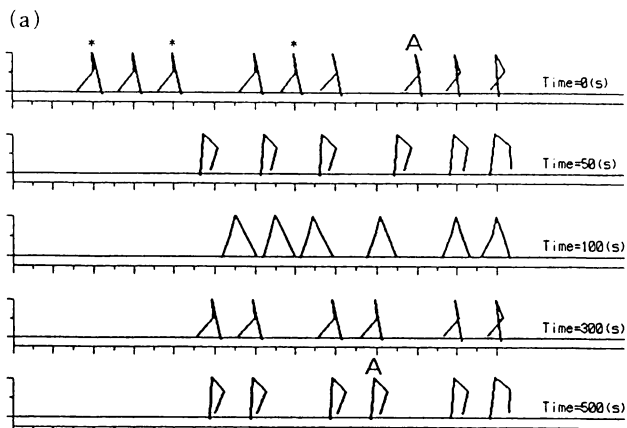


図5 リアルタイムの相互補償性

ロボットが3グループ編成で歩行中に3体のロボット(図中の*)を急に除去することを試みてみた。その結果、図5(a)に示すように、最終的に6体のロボットで3グループが自発的に再編成された。これは身体的コヒーレンスがシステムサイズの変化に対応してリアルタイム生成し、個々のロボットがそれを解釈し、図5(b)のように「場」が再構成され、歩行パターンが再限定されたからである。たとえば図中のロボットAは最初は1番目のグループであったが、結果的に2番目のグループになっている。このような個々のロボットの機能表現の間での相互補償性は、除去あるいは追加するロボットの位置とその数に依存せず観察された。もし、このような制御ルールを前もってすべて記述したら、制御プログラムにおいて記述量の爆発が生じることは容易に想像される。

4. まとめ

本研究事例では、予測できない環境に対応できる創発システム的设计原理の1つとして、自己言及性に基づくアプローチを提案した。特に、生物システムの研

究から得られた知見に基づき、システムと環境が不可分な関係としての「場」を生成し、それに基づいてシステム自身の視点から拘束条件を自己創出できるメカニズムに注目した。そして、知的マルチエージェントシステムの一例としてマルチロボットシステムを取りあげ、それにおけるグループ編成としての機能分散とその相互補償性の実現を試みた。なお、本アプローチは自己組織に基づくアプローチと根本的に異なる指向をもつことに注意する必要がある。自己組織系は、システムが設計者の視点から構築されており、拘束条件があらかじめ固定されている1中心的モデルである。たとえば、行動ベースAI⁶⁾やグローバルエントレインメント⁷⁾がそれに相当する。一方、自己言及系は、自己組織系に拘束条件生成の内部モデルをつけた2中心的モデルであり、システム自身にとっての視点から拘束条件の自己生成の問題を扱うところに大きい特徴がある。

ただし、このようなアプローチをとったとしても、上記モデルはわれわれの視点から記述されたモデルであるから、完全な意味でそのシステムにとっての自己言及を実現することは不可能である。特に、内部モデルとしてのコンテキスト系をどのように構成するかということが重大な問題である。まず、何を「場」の情報とみるか、それからどのように拘束条件を作るか、という2つの問題である。これらには一般的な解はないと思われる。むしろ個々のシステムの主体性が関与する領域であり意味論の領域である。結果的に、いまは設計者としての人間が発見的に構成せざるをえない状態にある。その意味では、自己言及というよりも、システムの記述をメタレベル化するという方が実体に近いかもしれない。したがって、自己言及性を記述することと同時にそれを活用することの重要性がある。そこで著者は、人間の自己言及サイクルのなかに人工システムとしてのロボットを埋め込み人間を支援するアプローチも試みている^{9),10)}。

(1996年4月22日受付)

参考文献

- 1) Y. Miyake, M. Yano and H. Shimizu: Relationship Between Endoplasmic and Ectoplasmic Oscillations During Chemotaxis of Physarum Polycephalum. *Protoplasma*, 162, 175/181 (1991)
- 2) Y. Miyake, Y. Yamaguchi, M. Yano and H. Shimizu: Environment-dependent Self-organization of Positional Information in Coupled Nonlinear Oscillator System-A New Principle of Real-time Coordinative Control in Biological Distributed System, *IEICE Trans.*, E76-A, 780/785 (1993)
- 3) Y. Miyake, S. Tabata, H. Murakami, M. Yano and H.

- Shimizu: Environment-dependent Self-organization of Positional Information Field in Chemotaxis of Physarum Plasmodium, *J. Theor. Biol.*, **178**, 341/353 (1996)
- 4) 三宅美博: 位置情報「場」と生命的自律性—粘菌の走性における環境適応的パターン形成, *数理科学*, **394**, 56/63 (1996)
- 5) Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: Mutual-entrainment-based Communication Field in Distributed Autonomous Robotic System, In: *Distributed Autonomous Robotic Systems* (H. Asama (ed.)), Springer-Verlag, 310/321 (1994)
- 6) Y. Miyake: Ba Oriented Intelligence, *Proc. 5th Intelligent System Symp.*, Tokyo, Japan, 235/240 (1995)
- 7) G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: Self-organization Control of Bipedal Locomotion by Neural Oscillators in Unpredictable Environment, *Biol. Cybern.*, **65**, 147/159 (1991)
- 8) R. A. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE J. Robotics Automat.*, **RA-2-1**, 14/23 (1986)
- 9) Y. Miyake and H. Shimizu: Mutual Entrainment Based Human-robot Communication Field, *Proc. of 3rd IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication*,

Nagoya, Japan, 118/123 (1994)

- 10) 三宅美博: 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*, 79/109 (1995)

[著者紹介]

み やけ よし ひろ
三宅美博君



1959年6月8日生, 83年東京大学薬学部卒業, 89年同大学院博士課程修了(薬学博士)。金沢工業大学情報工学科助手, 講師, 助教授を経て, 96年より東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻助教授。生命的自律性の研究からスタートし, いまは設計的場所論について関心をもっている。生物物理学会, ロボット学会, 人工知能学会, 神経回路学会などの会員。

賛助会員各位へ「製品紹介」欄へのご投稿のおすすめ

会誌編集委員会

会誌編集委員会では、「製品紹介」欄に多数のご投稿をお待ちしております。下記案内をご参考いただき、ふるってご応募くださいますようおすすめいたします。

- (1) 製品紹介掲載基準: 賛助会員の製品, 特に計測と制御の分野で重要な素子, 機器, 装置, システムなどの新製品であって, 実用化, 商品化の程度が高く, かつ独創性, 有用性もしくは発展性の高い新製品について, その使用目的, 構成, 原理, 構造, 機能などの概略を紹介するもの。図, 表, 写真などを含み, 刷上り1ページまたは2ページとします。
- (2) 採録: 会誌編集委員会において査読を行います。原則として, 受付順に早期掲載を取り計らいます。
- (3) 掲載料: 記事刷上り1ページの場合 25,000円(税別)
// 2ページの場合 50,000円(税別)
- (4) 申込方法: 投稿を希望される方は, ①会社名(住所), ②担当者名(部課名, 電話, FAX, E-mail), ③製品名, ④希望ページ数(1ページまたは2ページ)をご記入のうえ, 下記にお申し込みください。
※規程行数については, お問い合わせください。
- (5) 申込・問合せ先:
(☎113)東京都文京区本郷1-35-28-303 (社)計測自動制御学会 会誌編集委員会 (事務局担当: 鈴木康一)
電話(03)3814-4121, FAX(03)3814-4699
- (6) 新製品開発賞規程により, この欄に掲載された製品が同賞の選考対象となります。