

- sors”, Neural Networks, 5, 687(1992)
- (15) S. Yoshizawa, M. Morita & S. Amari :  
“Capacity of Associative Memory using a  
Nonmonotonic Neuron Model”, Neural  
Networks, 6, 167(1993)
- (16) J. M. Karlholm : “Associative Memories  
with Short-Range, Higher Order Cou-  
plings”, Neural Networks, 6, 409(1993)
- (17) 伊藤・湯浅・伊藤 : 「反応拡散方程式を用いた  
自己想起型連想記憶による画像認識」, 計測自  
動制御学論, 30, No.1, 97 (1994)

#### 4.2 「場」指向制御

「場」指向制御とは、生命システムのもつ生成的な自律性を支える制御原理である。本節では、このような生命的自律性の論理形式を明らかにし、人工システムにおける「場」指向制御を実現する方法に関して説明する。特に、マルチロボットシステムにおける、状況に応じた多様な機能創発の問題を設定し、そのような制御モデルの具体的構築例を示す。

##### 4.2.1 はじめに

従来の知的人工システムでは、設計者がシステムと環境を分離し環境の状態とシステムの応答の集合をあらかじめ規定し、その関係をルールとして規定することによって明示的にシステム設計する方法が用いられてきた。しかし、これでは環境が複雑化するにつれシステムが際限なく肥大化し、しかも、あらかじめ予測できない環境には対応できないという原理的限界がある。一方、生命システムは、それよりもはるかに複雑な環境のなかでも自律的に生きていくことができる。これはシステムと環境の相互作用を通して「場」を自己組織し、適切な拘束条件をリアルタイムに自己創出できることに基づいている。本節の目的は、このような生命的自律性に基礎をおく「場」指向システムの設計原理を明らかにすることである。

##### 4.2.2 拘束条件の自己創出に基づく「場」指向制御

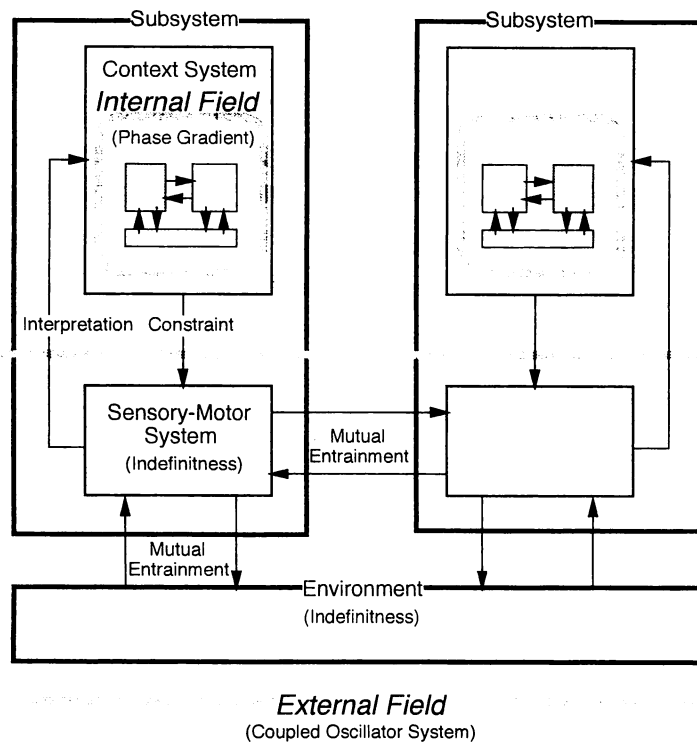
生命システムは、内部をもつというところに大きい特徴がある。そして内部は全体に対して部分系であることから、内部それ自身は全体の認識や

制御において完全情報系にはなりえないという原理的限界をもつ。したがって、生命的自律性を支える創発性の問題は、システムの内側からの視点に基づいて、一種の不良設定問題としての情報の部分性の問題（以下、部分情報問題と呼ぶ）としてとらえなければならない。そして、ここにこそ、生命システムが拘束条件を自己創出しなければならない必然性がある。

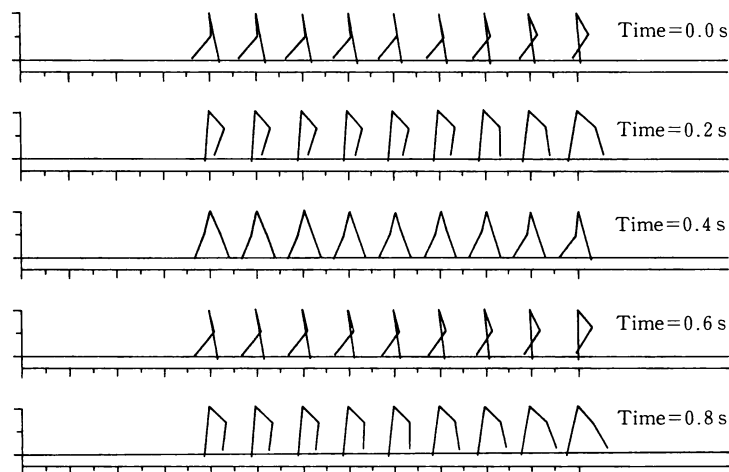
この問題のモデル系として、これまでに著者は粘菌という生物の形態形成の問題に取り組んできた。この生物は多数のサブシステムから構成される分散系であり、それらサブシステムの間では近接的な情報交換しかできないにもかかわらず、個々のサブシステムはシステム全体のなかでの相対的な位置関係に応じて適切に機能限定を受けることができる。これはサブシステムの視点に立てば、近接相互作用に起因する部分情報問題をなんらかの方法で解決できていることになる。そしてこのモデル系の解析から以下のメカニズムが明らかにされた<sup>(1)~(3)</sup>。

個々のサブシステムは、4.8図のように、多義的な機能表現の可能な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から構成される。感覚運動系はリズムの性質をもち、隣接する同様の系および環境との間での近接相互作用を通して相互引込みを生成し、結果的にグローバルなコヒーレント状態としての外部場を自己組織する。さらに、その秩序状態が個々のサブシステムのコンテキスト系によって解釈され、その内部に位相勾配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なかでの位置関係および環境との関係を表現しており、部分としてのサブシステムのなかにシステム全体が映されていることになる。さらに、その内部場に基づいて拘束条件が生成され、自己言及的に感覚運動系の機能表現の無限定性が限定される。このように外部場と内部場という2中心間での相互作用を通して、部分のなかに全体が映され、拘束条件の自己創出が可能になり部分情報問題は解決される。

そこで本節では、上記のメカニズムに基づいて分散的人工システムにおける機能創発を実現することを試みる。特に、ここではマルチロボットシ



4.8図



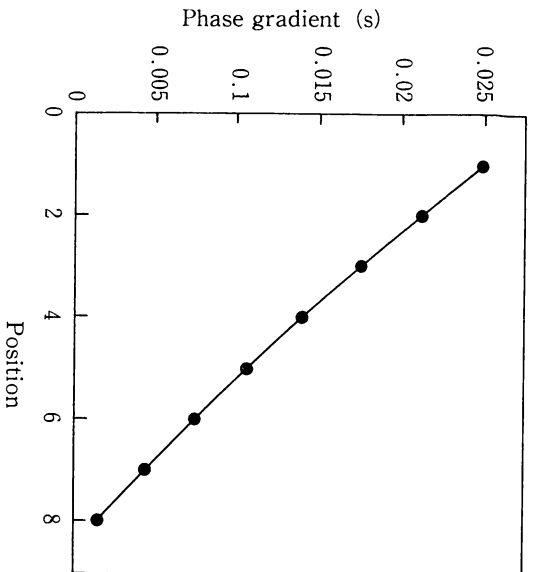
4.9図

システムが協力してグループ編成する問題と、大きい荷物を協力して運搬する問題を設定し、その具体的な制御モデルの構築を通して、「場」指向システムの設計の可能性を探る。

#### 4.2.3 グループ編成マルチロボット

まず最も簡単なケースとして、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の実現を試みた<sup>(4)</sup>。そして個々のロボットを上記モ

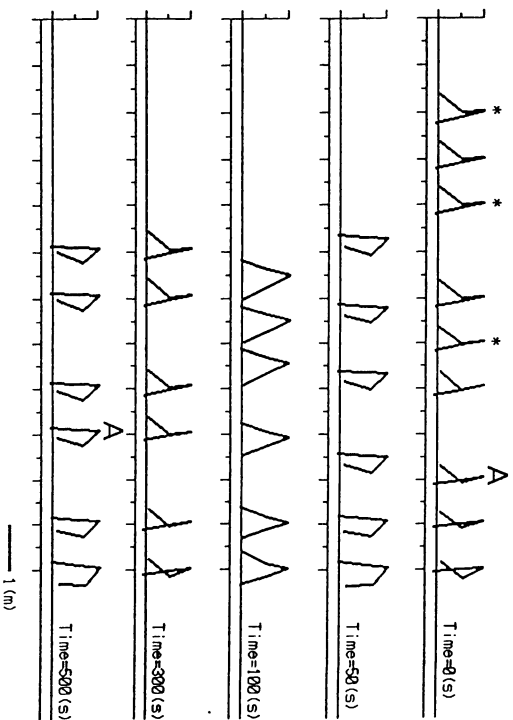
デルのサブシステムに対応させ、近接的相互作用を通してしか情報交換できないようにすることで、人為的に部分情報問題を生成させた。このとき個々のロボットの感覚運動系は、最初はその歩行パターンの多義性を限定することができないが、近接ロボットの歩行リズムとの相互引込みを通して外部場を自己組織し、それをコンテキスト系が解釈し内部場を生成し拘束条件を生成するこ



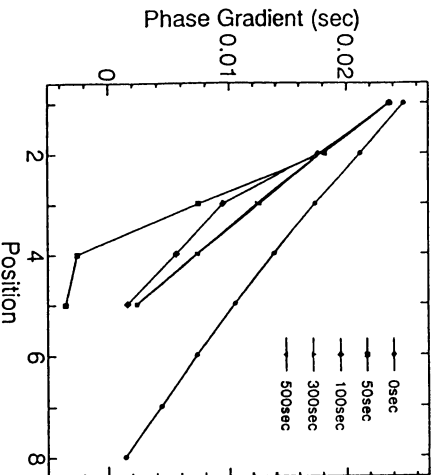
4.10図

とで、歩行パターンの多義性が適切に限定されるようになる。  
 具体的に感覚運動系としては、多賀の2足歩行モデルを用いた<sup>(5)</sup>。これは、多義的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込みを通してグローバルな運動パターンとして外部場が自己組織される。隣り合っ  
 て人と歩いたとき自然と歩行リズムが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。このような条件下での外部場の一例を4.9図に示す。

(a) Walking pattern

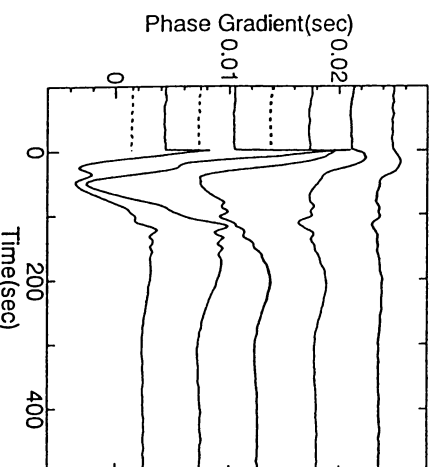


(b) Phase gradient pattern



4.11図

(c) Phase gradient



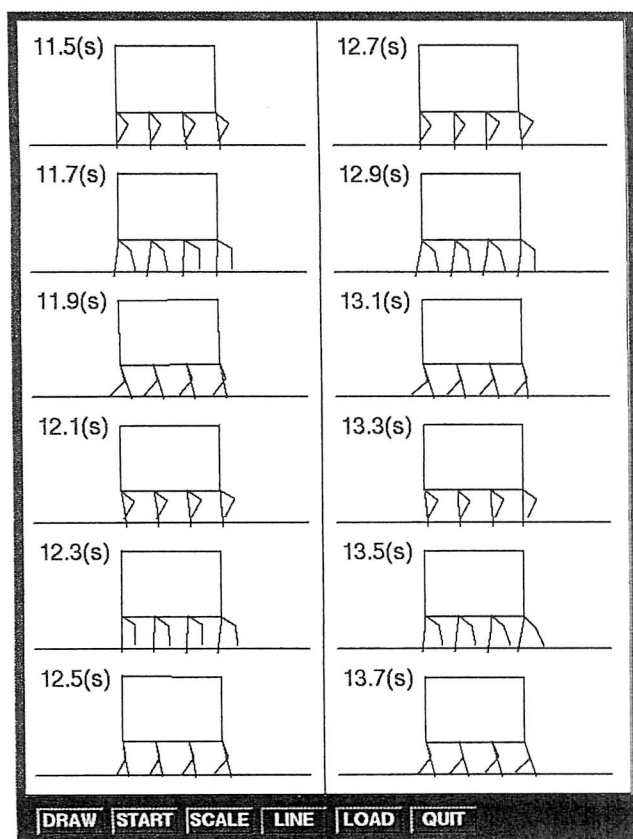
時間差を位相勾配として計算すると、4.10図のように隊列の先頭から末尾にかけて直線的に変化しており、これはロボット間の相対的位置関係を示す情報を表現している。そこで、これに基づいて拘束条件を生成し、感覚運動系における歩行パターン、特に歩幅を限定することで、ロボット相互の距離が調節されグループ編成を達成する。

このような制御は予測できない環境下で特に有効である。ここでは、その一例として、3グループ編成で歩行中にいくつかのロボットを急に除去してみた。その結果、4.11図のように、最終的に3グループが自発的に再編成された。これは外部場とその解釈としての内部場がシステムサイズの変化に対応してリアルタイムで再構築され、個々のロボットの機能表現が再限定されたからである。たとえば図中のロボットAは最初はグループ1であったが、結果的にグループ2になっている。このような相互補償は、ロボットを除去あるいは追加する位置とその数に依存せず観察された。

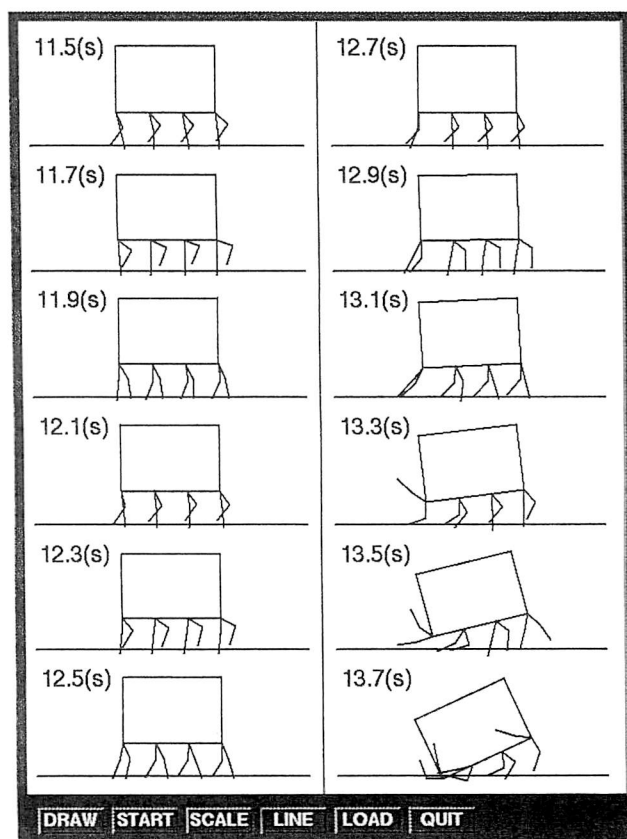
#### 4.2.4 荷物運搬マルチロボット

グループ編成モデルでは、外部環境を一定と仮定しているため、環境とシステムの間での相互作用を通して生成する機能の問題を扱えない。そこで、さらにマルチロボットが大きい荷物を役割分担して運搬する問題への拡張を進めている<sup>(6)(7)</sup>。

まず、個々のロボットの感覚運動系は先と同様であり、このようなロボット群と荷物の中で自己組織される外部場の一例を4.12図に示す。また、4.13図に外部場の生成に失敗した場合を示す。このときコンテキスト系は、歩行リズムに伴う腰の上下振動を解釈するようにした。その結果、位相勾配は、先のグループ編成モデルと同様に、隊列の先頭のロボットから末尾にかけて単調に変化する。さらに、周期は荷物が軽いときは歩行周期の約1/2であるが、運べる重さの限界に近づくと歩行周期に近い値へと不連続転移する。これらのことは、各ロボットの相対的位置関係が内部場の位相勾配に、ロボットと荷物の相互関係が周期性に表現される可能性を示している。さらに、これに基



4.12図



4.13図

づいて拘束条件を生成し、個々のロボットの歩行パターンの多様性として機能分散することの有効性も示唆された。現在、このモデルにおける状況依存的な機能分散やその相互補償の問題に取り組んでいる。

#### 4.2.5 考 察

本節では、複雑で予測できない環境に対応できる人工システムの設計原理として、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が拘束条件を自己創出する「場」指向制御の方法を提案した。具体的には、マルチロボットシステムにおける機能創発の実現を試みた。

ただし、現状では内部モデルとしてのコンテキスト系をどのように構築するかということが本質的問題として残されている。まず、なにを解釈するか、それからどのように拘束条件を作るか、という問題である。これは生命システムでは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、現状では人間が設計者として発見的に関与せざるをえない状態にある。その意味でも、完全な意味での拘束条件の自己創出は不可能である。むしろ、システム設計をメタレベル化するという方が実体に近いと考えられる。その意味でも、生命システムから学ぶことの重要性がある。また多くの構築例から一般的ルールを発見することも重要であろう。

最後になったが、本設計原理は自己組織性に基づくアプローチとは根本的に異なる指向をもつものであることに注意する必要がある。自己組織系ではシステムが観察者の視点から構築されており、拘束条件はあらかじめ規定されている。しかし、本手法ではシステム自身にとっての視点から拘束条件の自己創出の問題を扱うことが目的である。そして、これは2中心性を導入することによって初めて可能になるのである。

#### 参 考 文 献

- (1) Y. Miyake, M. Yano & H. Shimizu: "Relationship between Endoplasmic and Ectoplasmic Oscillations during Chemotaxis of Physarum Polycephalum", *Protoplasma*, 162, 175(1991)
- (2) Y. Miyake, Y. Yamaguchi, M. Yano & 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. Fundamentals*, E76-A, 780(1993)
- (3) Y. Miyake, S. Tabata, H. Murakami, M. Yano & H. Shimizu: "Environment-dependent Self-organization of Positional Information Field in Chemotaxis of Physarum Plasmodium", *J. Theor. Biol.* (in press)
- (4) Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi & H. Shimizu: "Mutual-entrainment-based Communication Field in Distributed Autonomous Robotic System", In: *Distributed Autonomous Robotic Systems*, H. Asama, eds, Springer-Verlag, 310(1994)
- (5) G. Taga, Y. Miyake, Y. Yamaguchi & H. Shimizu: "Generation and Coordination of Bipedal Locomotion Through Global Entrainment", *Proc. Int. Symp. Autonomous Decentralized Systems*, Kawasaki, Japan, IEEE Computer Society Press, 199(1994)
- (6) Y. Miyake: "Ba Oriented Intelligence", *Proc. 5th. Intelligent System Symp.*, Tokyo, Japan, 235(1995)
- (7) Y. Miyake: "Diversity Generation and Function Emergence in Multi Robot System", *Proc.8th SICE Symp. Decentralized Autonomous Systems*, Tokyo, Japan, 355(1995)

#### 4.3 人工生命技術

人工生命とは、生命特有の現象をコンピュータ上のソフトウェアやロボットなどのハードウェアで模擬したり、高分子タンパクや生きた細胞で実現しようとする試みである。しかし、「人工生命」の明確な定義はない。