

自律分散ロボットにおける
リズムの相互引き込みを用いた「場」的制御
――予測できない環境下での協調的システム制御に向けて――

金沢工大・工・情報 ○三宅美博 京都大・基礎物理学研 多賀敏太郎
東京電機大・理工・情報 山口陽子 金沢工大・場の研究所 清水 博

Mutual-Entrainment-Field-Based Control in Autonomous Decentralized Robotic System
..... Coordinative System Control in Unpredictable Environment

○Yoshihiro MIYAKE: Kanazawa Institute of Technology, Gentaro TAGA: Kyoto University
Yoko YAMAGUCHI: Tokyo Denki University, Hiroshi SHIMIZU: Kanazawa Institute of Technology

1 はじめに

工学的システムの設計方法の特徴は、予め構成要素の機能を定義した上でシステムを構築するという点にあると思われる。しかし、この方法論の有効性は以下の2つの条件を満たす場合に限定される。第1はシステムの目的をあらかじめ明確に規定できること、第2はその目的を部分問題に分割できることである。

このような限界は、本レポートの主題でもある予測できない環境下での協調制御の場合に明白になる。そのような場合には、システムの機能をその環境と独立に定義できること、システム構成要素の機能をそのシステム全体と独立に定義できることの2点が保証されないからである。その意味で、実世界に出た人工知能システムのプログラムの大半が例外処理であることは当然と言える。

このような設計方法に対抗して、機能を自発生成させる方向での設計に最近注目が集まっている。例えば、マルチエージェントシステムの研究は明らかにこの流れにあるものである。しかし、サブサンクションアーキテクチャや契約ネットプロトコールにおいても従来の設計論が踏襲されており、基本的にその枠組みをこえるものではない。

これに対して、生命システムの設計原理は工学システムのものとは根本的に異なっているように思われる。例えば発生現象において、均質な細胞集団から分裂を経て個々の細胞の機能が分化し形態が創出されていくプロセスは、その特徴をよく表している。そこで生物のもつ、このような機能の無限定性に基礎をおくエマージェントな制御方法を明らかにし、予測できない環境下において機能する工学システムの設計原理として取り入れていくことは極めて重要なことである。

2 「場」の自己組織に基づく制御

われわれはこれまで図1に示す粘菌という生物の走化性における形態形成をモデル系として、その設計原理を研究してきた。その結果、機能的に無限定な構成要素間で状況コンシステントな制御情報が自己組織されることによって機能が規定されることが明らかになった。特に、リズムの相互引き込みを通して生成されるコヒーレントな位相関係の「場」として、制御情報がシステムと環境との関係および構成要素間の関係に基づいて適切に自己組織されることが示された。各構成要素はこの情報を解釈することで、他の部分とさらには環境と辻褃のあったコンシステントな機能的かつ意味的な関係を構築することが可能になる。

そこで本レポートでは、そのような設計原理の応用例として自律分散ロボット、特にマルチロボットシステムにおいて、予測できない環境下での協調制御を試みたので報告する。具体的には1次元状に配置した歩行

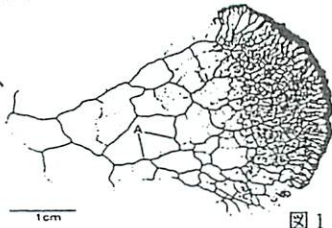


図1

ロボット集団における、環境変化に対応する役割分担の協調的な再構築として「場」的制御の特徴を明らかにする。

3 システム構成

システムの基本構造は図2のように2階層からなり、一つはリズム生成系から構成されるコミュニケーション層であり、もう一方はマルチロボット層である。

各歩行ロボットとしては、リズムを生じるものであれば特に限定されないと考えられる。そこで図3に示す、われわれのグループから提案された2足歩行モデルを計算機でシミュレートすることによって実現する。これは神経リズムジェネレーターと筋骨格系の循環的相互作用を通して、安定な歩行パターンを自律生成するモデルである。

コミュニケーション系は、各ロボットの神経リズムジェネレーター間での歩行リズムを介した相互作用として実現される。隣り合って人と歩いたときに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。そこで、各ロボットの足の接地タイミングをパルス信号として、隣り合うロボットの対応した神経系に入力する。(詳細は引用文献を参照)

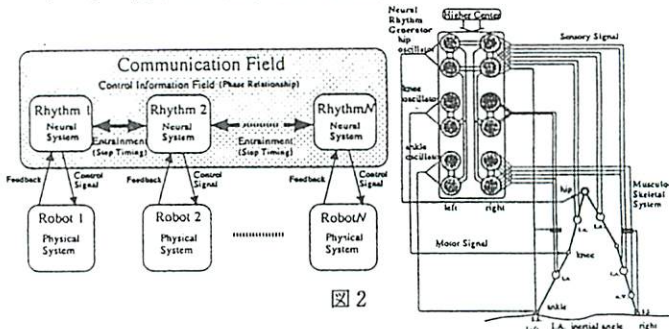


図2

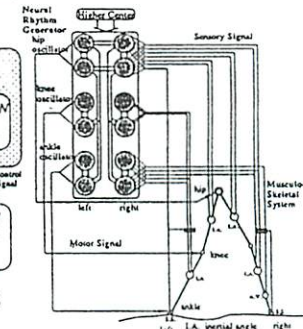
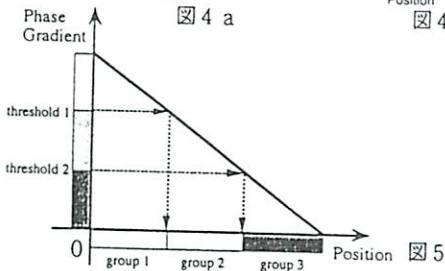
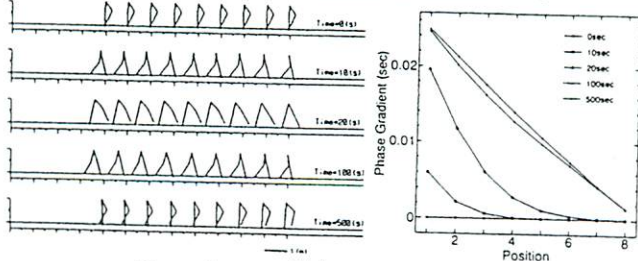


図3

4 制御情報場の自己組織

このような条件下で得られた、マルチロボットシステムの歩行パターンの時間発展を図4 aに示す。ここでは、最初に先頭のロボットの歩行リズムの固有周期が変調されており、残りのロボットの固有周期は一致している。しかし相互引き込みによって見かけ上の周期が一致し、徐々に同調していくのがわかる。このとき隣接するロボットの足の接地タイミングの時間差を位相勾配と定義すると、図4 bのように先頭から末尾にかけて直線的に減少する位相勾配パターンが自己組織されている。このようなグローバルなパターンは、空間的位置関係を示す座標系となるのみならず、協調的役割分担における機能的関係を示す座標系として、システムの制御情報を担い得ると予想される。そこで図5のような、しきい値を導入することで、この制御情報場を解釈しロボット間距離を調整し、位置に応じた3つの機能グループを編成させる協調制御を試みた。この結果は

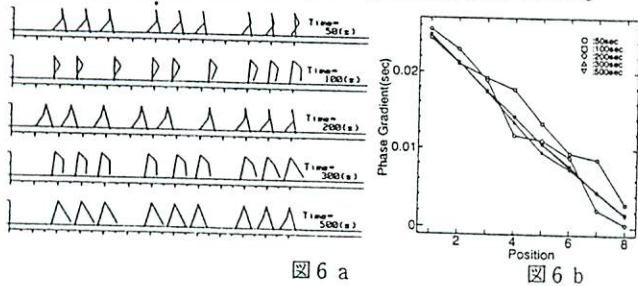
図6 aの一番上の図に示す通りである。簡単のため、以下全ての場合においてグループ数は3つに固定した。



5 予測できない環境下での協調制御

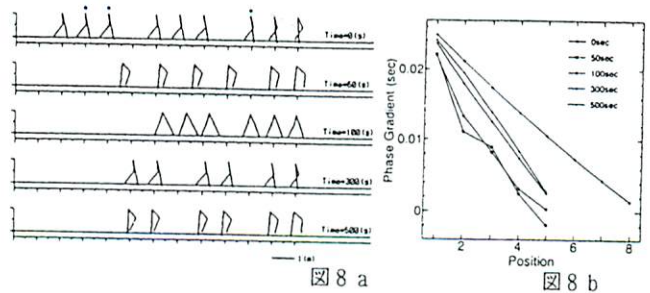
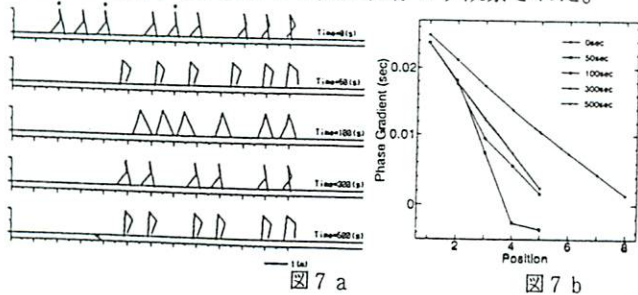
5-1 システムへの外乱

予測できない環境変化の一例として、9体のロボットが3つのグループを構成して歩行中にロボットの一つ（*で示す）に外力を加えたときの結果を示す。図6 aに示すように、一時的にグループパターンが乱れるが、最終的にもとのパターンが再構築された。これは図6 bのように制御情報場としての位相勾配パターンが外乱に対して安定であるからである。このような現象は、ロボットが転倒しない範囲内で、外力の位置と大きさに依存せず観察された。



5-2 システムサイズ変化

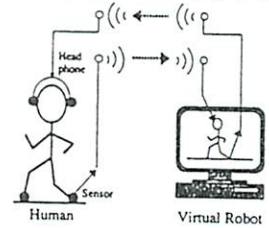
つぎに9体3グループで歩行中に3体のロボット（*で示す）を除去した結果を示す。図7 aに示すように、6体になっても、もとの3グループパターンが自発的に再編成された。これは図7 bのように、制御情報場としての位相勾配パターンがシステムサイズの変化に対応して再構築されたからである。同様に、異なる位置において3体のロボット（*で示す）を除去した例を図8に示す。このようなグループパターンが保存される現象は、ロボットを除去あるいは追加する位置とその数に依存せず観察された。



6 人間-ロボット共存系への拡張性

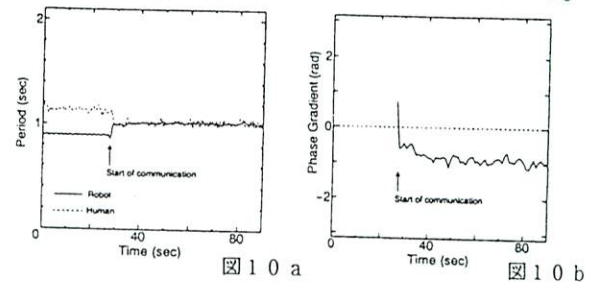
6-1 コミュニケーションシステム

予測できない環境として人間を捉え、人間とロボットが協調歩行する場合を考えてみる。最も単純な場合として、図9のように、計算機内に構築した歩行ロボット1体と人間をリアルタイムでコミュニケーションさせる。そのメカニズムは先と同様であるが、ここではロボットの足の接地タイミングを音として合成し人間に聞かせ、逆に人間の足の接地タイミングはセンサーで検出し計算機に送った。



6-2 位相勾配パターンの生成

その結果、図10のように人間とロボットの歩行リズムの固有周期が異なる場合でも、相互引き込みを通して周期が同調し位相勾配も安定に生成された。このことは人間-マルチロボット共存系においても、予測できない人間の行動に対して、位相勾配パターンとしての制御情報場を適応的に自己組織し協調制御され得る可能性を示している。



7 まとめ

以上の結果より、システムの制御情報がリズムの相互引き込みを通して生成される「場」として、システムと環境との関係および構成要素間の関係に基づいて適切に自己組織されることが明らかになった。そしてそれに基づいて、マルチロボットシステムが予測できない環境下においても協調的に機能分散でき、さらに人間とロボットの共存系への拡張性も示された。このことは、本レポートの提案する設計原理の有効性を強く示唆するものである。

引用文献

- [1] Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi and H. Shimizu, "Mutual entrainment field based control in distributed autonomous robotic system," Proc. of 2nd. Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems, Saitama, Japan, pp. 85-88, 1994.
- [2] 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, pp. 118-123, 1994.