

学位論文題名

Distributed Pattern Generator  
for Amoeba Like Multi-Cell Robot Control

(アメーバ状マルチセルロボット制御のための分散パターン発生器)

学位論文内容の要旨

近年、ロボットの周辺技術の急速な進歩により、ロボットに求められる機能やその構造は大きく変貌しつつある。特に、軟性機械とその制御は、分散自律ロボットや Animat 等のロボット研究分野で重要な位置を占めている。軟性機械は、今まではロボットが進出できなかった家庭内や福祉といった領域に、適用できるのではないかと期待がされている。その軟性機械の定義としては、1) 動的に変化する環境に適応可能であること。2) 構造に多くの自由度があり、冗長性があること、この2つが挙げられる。

既に多くの研究者によって、多自由度を実現するロボットが研究されており、その殆どは、冗長で多自由度な機構を実現する為に、多くの機械部品とアクチュエータから構成されている。しかしながら、多くのコンポーネントとアクチュエータを構成要素にもつロボットは、その制御の複雑さが問題となる。アクチュエータの数が増えれば、それだけ制御パラメータが増え、ユニットの数が増えれば、それだけ相互作用が複雑になる。一般的な研究では、Genetic Algorithm, Genetic Programming, そして Neural Network がそのような多くのパラメータを持つ制御に用いられているが、その学習的制御則の獲得の為に、多くの試行が必要であり、それらのアプローチは環境等が変化した時に適応できないという大きな問題が存在する。

そこで、本研究ではアメーバ自己組織化モデルを提案する。実際に、軟性ロボットに必要とされる適応性、冗長性のような特徴は、まさに生物の生来の特徴であるといえる。本研究では、特に、柔らかく原始的な生き物のモデルとして、粘菌変形体に着目する。粘菌変形体は、特化した感覚器官や運動器官を持たないにも関わらず、全体としては統合された振る舞いをするという、基本的な情報処理能力を持つ。本研究の目的は、アメーバのような軟性機械マルチセルロボットの制御系を構築する事である。生物学が発見した膨大な事実の中から、粘菌の根底に横たわる情報生成のルールとパターン生成のルールの枠組みを得て、そして、そのスキームを用いてロボットに対するシステムの制御系を構築することが、本研究の目的である。

粘菌を工学的に参考にしたロボットデザインの特徴は、Implicit coordination である。Swarm intelligence 等のように、個々にはあまり知的でないエージェントの集団であるにもかかわらず、全体ではロボストで高い適応力を示すシステムの構築を試みている。その実現に関して最も大きな問題は、いかに個々のエージェントの振る舞いを統合して、コヒーレントな振る舞いを達成するかということである。本研究の個々のエージェントは、それぞれセンサを持ち、環境の変化を検知し、行動する reactive agent である。秩序を失わずに、全体で統合された動きを生成するために、本研究では、Distributed Pattern Generator システムを提案する。DPG はロボット全体に分散された振動子から、統一された情報振動パターンを作り出すためのシステムである。

DPG は多くの分散した振動子から成る。それぞれエージェントが振動子を有し、各振動子は自励振動している。そして、環境からの刺激は振動に変換される。この局所的な振動数の変化が、引き込みという物理的な自己組織化現象によって全体では同期し、このとき生じる振動の位相勾配が、ロボット全体での統合された情報

となる。つまり、DPG は分散された情報を自己組織的に統合するための振動子結合系であるといえる。

本論文は、9 章から構成されており、その概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の目的、背景、課題について論じ、大自由度を実現する自律分散ロボットについて、これまでの軟性機械の構築に関する研究の動向と、現時点での問題点について述べる。そして本研究の設計の基本方針について、制御系、構成要素、相互作用、情報伝達手段の 4 つの側面から系統立てて論じている。

第 2 章では、SMA-net ロボットの詳細なデータを述べている。一般に、粘菌運動は、細胞骨格の伸縮に基づいた細胞内の原形質の流動によって行われるが、その流動を引き起こす細胞膜の伸縮を、連接バネ構造として単純モデル化し、ロボットの構造としている。さらに、バネの伸縮を行う装置として、形状記憶合金をアクチュエータとして用い、ロボットの運動機構の簡素化、軽量化を実現している。そして、実際に多数のアクチュエータを持つ自律分散制御ロボットの制御システム構築についての問題点、制御パラメータ増大の問題を論じている。

第 3 章では、本研究で取り扱う粘菌の生化学的特徴を述べている。ここで扱うのは、粘菌変形体と呼ばれる、多細胞粘菌における餌の探索行動である。粘菌変形体は、均質な細胞原形質の集合であり、特化した感覚器官や運動器官を持たないにもかかわらず、全体では一致して誘引物質の方へ移動するという走化性を備えている。そして、この走化性には、各原形質の自励振動現象と、全体での引き込み現象と、そのときに生じる位相勾配が重要な役割を果たしていることが述べられている。

第 4 章では、3 章の粘菌を工学的に参考にして、ロボットの設計方針を論じている。環境からの刺激を振動に変換して、非線形振動子の相互引き込みの際に生じる位相勾配によって情報を統合する DPG を提案している。そして、Unit-based Architecture についても論じている。

第 5 章では、DPG システムの核となる非線形振動子と、その局所的相互結合の 2 つを定式化している。実際の粘菌の内部での自励振動現象は、相関する数多くの化学反応の結果生じるものであるが、ここでは工学的に扱いやすい van der Pol 型の振動子を提案している。そして、実際に引き込みと位相勾配をシミュレートし、提案した 2 つの数式におけるパラメータの意味と特性を、様々な計算機実験によって論じている。

第 6 章では、より具体的なマルチセルロボットの計算機実験を行うための、幾つかの付随する拘束条件等の数式について述べている。実際に、障害物回避等の計算機実験を行い、提案モデルの有効性を論じている。

第 7 章では、形態形成を用いた機能分化モデルを提案している。前章まではエレメントが相互作用によって自己組織的にコヒーレンスを生成し、マクロな均質性が生まれることを利用していたが、本章では、更にマクロな領域で、非均質性が生じるモデルを用いて、機能分化に用いることを提案している。拡散反応場における形態形成を応用したシステムを提案している。

第 8 章では、DPG 及び振動子結合系を、幾つかのアプリケーションに適用して、有効性を論じている。

第 9 章では、論文全体を概して議論し、総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇  
副 査 教 授 大 内 東  
副 査 教 授 大 森 隆 司  
副 査 教 授 和 田 充 雄

学 位 論 文 題 名

## Distributed Pattern Generator for Amoeba Like Multi-Cell Robot Control

(アメーバ状マルチセルロボット制御のための分散パターン発生器)

近年、人工生命研究や進化計算研究に触発され、ロボティクス分野においても、その具備すべき諸機能を自律適応的に獲得可能なロボットの実現に向けたパラダイムシフトが顕著である。その流れの中心をなすのが、より生物に近い機能、形態、材料の実現への模索、換言すれば生物の持つ柔軟性や適応性の工学的実現への研究である。そして、ヒューマノイド指向のみならず、汎用性の高いロボットを実現するために、柔軟な機構や構造を持つ軟性機械に関する研究が盛んに行われるようになって来ている。このような軟性機械の実装としては、多数のロボット群の集合により全体として1つのロボットを構成するという手法があるが、このような多数のユニット群の相互作用によりロボット全体の動作および機能を制御する際の決定的な方法論は提唱されておらず、その確立が望まれている。

本論文では、軟性機械が目的とする多くの冗長性を備えた環境適応行動の例として粘菌変形体を挙げ、その情報処理や物理現象を工学的に参考にすることによって、粘菌自己組織化モデルを提案している。柔らかく原始的な生き物である粘菌変形体は、特化した感覚器官や運動器官を持たないにも関わらず、全体としては統合された振る舞いをするという基本的情報処理能力を持つ。生物学が発見した膨大な事実の中かから、この粘菌の根底に横たわる情報生成のルールとパターン生成のルールのスキームを得て、ロボットに対するシステムの制御系を構築することをその目的としている。

本研究の個々のユニットは、それぞれ環境の変化を知覚し行動するリアクティブエージェントであり、全体の秩序を失わずに統合された動きを生成するために、本論文では Distributed Pattern Generator を提案している。この DPG は多くの分散した非線形自励振動子から成り、各ユニットにおいて、環境からの刺激は振動に変換される。局所的な振動数の変化から、引き込みという物理的的自己組織化現象によって、位相勾配が全体に渡って生じ、これがロボット全体での統合された情報となる。DPG は分散された情報を自己組織的に統

合するための振動子結合系とみなすことができ、ロボット全体に分散された振動子から、統一された情報振動パターンを作り出すためのシステムとなる。本論文は、9章から構成されており、その概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の目的、背景、課題について論じ、これまでの軟性機械の構築に関する研究の動向を、制御系、構成、相互作用、情報伝達手段の側面から論じている。

第2章では、軟性構造ロボットのアクチュエータとして形状記憶合金を用いる利点を述べ、そして、多数のアクチュエータを持つ自律分散制御ロボット制御システムの問題点として、主に制御パラメータ増大を取り上げている。

第3章では、本研究で取り扱う粘菌の生化学的特徴を述べている。特に、走化性には、各原形質の自励振動現象と、集合全体での引き込み現象と、そのときに生じる位相勾配が重要な役割を果たしていることが述べられている。

第4章では、前章を工学的に参考にして、ロボットの設計方針を論じている。環境からの刺激を振動に変換して、局所的相互引き込みの際に生じる位相勾配によって情報を統合するDPGを提案している。

第5章では、DPGシステムの核となる非線形振動子と、その局所的相互結合の2つを定式化している。実際の粘菌の内部での自励振動現象は、相関する数多くの化学反応の結果生じるものであるが、ここでは工学的に扱いやすいvan der Pol型の振動子を提案している、そして、提案した2つの数式におけるパラメータの特性を、幾つかの計算機実験によって論じている。

第6章では、より具体的なマルチセルロボットの計算機実験を行うための、幾つかの付随すべき拘束条件について述べている。そして統合システムによって障害物回避等の計算機実験を行い、提案モデルの有効性を論じている。

第7章では、形態形成を用いた機能分化モデルを提案している。前章までは各要素の相互作用によって自己組織的にコヒーレンスが達成され、マクロな均質性が生まれることを利用していたが、本章では、更にマクロな領域で、非均質性が生じるモデルを用いて、機能分化に用いるために、拡散反応場における形態形成を応用したシステムを提案している。

第8章では、DPG及び振動子結合系を、幾つかのアプリケーションに適用して、有効性を論じている。

第9章では、論文全体を概して議論し、総括している。

これを要するに本論文は、エージェントが個々に環境の変化を検知し行動しながらも、全体の秩序を失わずに統合された行動生成を可能とする制御法を与えるものであり、ロボティクス及び、より一般的な系における制御手法に関する有益な知見を得ており、その複雑系工学、ロボット工学の分野に貢献することは大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。