

学 位 論 文 題 名

A Study on Mass Movement

（マスマーブメントに関する研究）

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。従来のロボット研究の指針は、人間型ロボットに代表されるように、その構造や形態及び機能は、設計者が予見し付与することのできるものと認識されてきた。しかしながら、次世代のロボットは、その構造のみならず機能的にも、従来とは比較にならない程の大自由度大変形可能性を具備するものが出現してくることは必須であり、大変形、分離、再結合、移動、時変性などの自在変形移動を行う新しい機械を想定し、その制御法を模索する時代に入りつつある。

本論文は、そのような大自由度大変形能を有する自在変形体ロボットを制御するために必要となる方法論を提案し、これを一般化することにより理論構築を行い、その成果をまとめたものである。理論構築のために、ロボットや機械といった被制御対象となる具象事物を大自由度を有するマス（塊）としてモデル化を行い、その運動（ムーブメント）の観測と解析をオートマタ相互作用により記述し、これらを統合することによりマスマーブメントに関する数理論的展開を図っている。

マスマーブメントの理論は、被制御対象の変形や運動に関わる法則性を自動的に抽出し、制御を行うルール群の再構築を行う方法論を構築する。本論は、これを基にしたルールマイニング手法を構築し、種々のマスマーブメントへの適用を通して、構築した理論の有用性と妥当性を検証した成果をまとめたものである。論文は8章より構成されており、以下にその概略を示す。

第1章は本研究の背景・目的・課題について論じ、マスマーブメントを多数オートマタの形式で記述するための原理を導いている。そこではマスマーブメント解析を実現する際のオートマタ形式記述の有用性、および妥当性を論じている。

第2章では、前章で提案したマスマーブメント解析の手法であるルールマイニング手法の実現について論じている。この章ではオートマタを内部状態と空間の記述法の観点から分類し、それぞれに対して、どのようなマスマーブメントが記述可能であるかの検討を行っている。

第3章では、これまでの研究事例の検証として、法則性を予め与えマスマーブメントの変化の様子からその関連性を分析するという従来の順方向の手法について事例を挙げ、その問題点について言及している。この章では、複雑系研究の魁となった Game of Life にはじまり、気体拡散モデル、セルラーオートマタを使ったマスマーブメント分析において初めて提案されたともいえる λ パラメータ、ハイパーサイクルモデル、タイルオートマトン、凝集律則拡散モデルなどの研究事例を挙げ、追実験をした結果を示し、これらのモデル化について検討している。

第4章では、セルラーオートマタの形式でのマスマーブメント解析の手法について提案し、検証を行っている。第1節では、第3章で行った検証を基に、従来の順方向でのセルラーオートマトンを使ったマスマーブメント解析の限界点について言及し、現象の観察から逆に法則性を求める手法、さらに進化的計算を用いて自動化するための手法について提案している。第2節では局所相互作用のみによる粒子集合規則の抽出について実験を行っている。第3節では、格子空間での物体の移動・回転について、その法則性を発見する手法について提案し、実験により問題点を

検証している。第4節では、Majority Classification Task を解析対象とし、時空間近傍範囲と解析能力の関連性について実験を行っている。第5節では、前節までに行った実験を基にセルラーオートマトン形式でのマスマーブメント記述の有用性と限界点について議論している。

第5章は、5節から構成され、マルチエージェントシステムの形式でのマスマーブメント解析の手法について提案し、検証を行っている。この章では典型的なマスマーブメントの事例として粘菌性アメーバの行動を取り上げ、法則性を抽出する実験を行っている。第1節では、マスマーブメントをマルチエージェント形式で記述するための定式化を行っている。第2節では、動画像を用いたアメーバ運動の特徴の数値化について議論し、特にアメーバ細胞形状の周期的変化を特徴量として扱うものとした。第3節では、実際のアメーバ細胞の運動においてみられる細胞行動と化学物質の濃度分布の関連性に注目し、仮想ポテンシャル場により情報の伝達と行動の決定を行うマルチエージェントシステムの提案を行っている。第4節では、第2節で提示した特徴量を、第3節で提案したアメーバ様マルチエージェントシステムの行動規則として抽出する進化的手法の提案を行っている。更に、第5節では、進化的手法で獲得された行動規則により発現するアメーバ様マルチエージェントシステムの行動に関する考察を行い、提案手法に関する検討を行っている。

第6章では、観察に基づくマスマーブメント解析の際に必須である特徴量について、これをも自動的に選択する手法として、競争型仮想細胞群による手法 (Artificial Cell Method) を提案し、検証を行っている。この章では特徴量抽出の対象として画像を用いている。第1節では、マスマーブメント解析における特徴量そのものの獲得の必要性について述べ、マスマーブメント解析における特徴量抽出システムの位置付けを行っている。第2節では、細胞の代謝・成長・淘汰をモデル化した Artificial Cell の定式化を行い、その生存競争から特徴抽出を行うの仕組みについて述べている。第3節では、提案したモデルの基本的な挙動について実験し、動作の確認を行っている。第4、5節ではそれぞれ FPGA 型の組換え可能型回路と制限付き関数の形式で画像の特徴を抽出した結果と、その有効性について検証している。第6節では、提案した特徴抽出法のマスマーブメント解析における有用性について議論している。

第7章では、提案したマスマーブメント解析で得られた法則性の分散型軟性機械の制御法として有用性を検証するために構築した、SMA-Net Robot について述べるとともに、その制御法への応用を図り、前章までに提案してきたマスマーブメント解析の方法論についての妥当性を検証する。第1節では、これまでに行われてきた分散型および柔軟構造機械についての研究を挙げ、その制御方法と問題点について検証している。第2節では、SMA-Net Robot の構成とその特徴について述べる。第3節では、SMA-Net Robot の分散制御法として結合振動子を用いた制御法を提案し、定式化を行っている。第4節では提案した制御法を SMA-Net Robot シミュレータ上で実験し、その有効性を検証している。第5節では、第6章までに提案されたマスマーブメント解析法で得られた法則性を、この制御法と組み合わせる手法について検討している。

第8章は、結論を述べたものである。すなわち、本論文は、マスマーブメント解析の手法としてオートマタ形式を用いた自動解析の方法論を提案し、さらにマスマーブメントの特徴量も自動的に抽出するシステムを提案することにより、未知の対象であるマスマーブメントからその法則性を自動的に解析できる手法であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇

副 査 教 授 大 森 隆 司

副 査 教 授 大 内 東

副 査 教 授 和 田 充 雄

副 査 助 教 授 横 井 浩 史

学 位 論 文 題 名

A Study on Mass Movement

(マスマーブメントに関する研究)

ロボット研究の新展開として、柔軟な構造や機構を持つ汎用性の高いロボットを実現するような軟性機械に関する研究が盛んに行われるようになってきている。軟性機械の実装としては、多数のユニット群により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方法論は殆ど提唱されておらず、その確立が望まれている。

本論では軟性機械が目的とする大規模な形と機能の変化を伴う環境適応行動の例として粘菌性アメーバを挙げ、そのような現象に見られる「マス（塊）」の全体の形と運動を表すマスマーブメントという概念を導入している。さらにマスマーブメントを多数の要素（オートマトン）が相互作用しあう複雑系であると捉え、相互作用の仕組みを自動的に解析するシステムを提案と解析システム構築の際の問題点を明らかにしている。

はじめに、これまでの多要素複雑系解析の研究事例として、法則性を予め与えマスマーブメントの変化の様子からその関連性を分析するという従来の順方向の手法、セルラーオートマトンについて追実験による検証を行い、それらのモデルが特定の対象にのみ特化しているという問題点を指摘している。

そして、この問題点を解決するマスマーブメント解析の手法として、3種類の異なるアプローチを提案し、それぞれの有効性・問題点が明らかにされている。

1つ目はセルラーオートマタの形式を用いたマスマーブメント解析の手法である。ここでは従来研究の検証を基に、現象の観察から逆に法則性を求める手法、さらに進化的計算を用いて自動化するための手法が導出されている。このアプローチの検証として、回転・移動物体やアメーバ画像からの規則抽出、Majority Classification Task を行う規則の抽出などを行い、時空間近傍範囲と解析能力の関連性を考察している。これらの検証実験は、近傍相互作用のみによるシステムの解析能力の限界と、特徴量導入の必要性が明らかにされている。

2つ目はマルチエージェントシステムの形式を用いたマスマーブメント解析の手法である。このアプローチでは1番目アプローチで問題となった、近傍相互作用のみによる限界を克服するため、実際のアメーバ細胞の運動においてみられる細胞行動と化学物質の濃度分布の関連性に注目した仮想ポテンシャル場により情報の伝達と行動の決定を行うマルチエージェントシステムによる解析手法が導出されている。また、特徴量に関する問題に対

しては、伸縮運動に関する特徴量を導入しこれを比較することでマスマーブメント解析を実行する部分を新たに組み込んでいる。このシステムによりアメーバの仮足伸縮運動の実現できるという知見を得ている。また、これらの実験から、設計者の与えた特徴量に特化して解析を行うことの問題点も明らかにしている。

3つ目のアプローチでは、2番目のアプローチで問題となった特徴量そのものの選択を自動化する手法が導出されている。ここでは細胞の代謝・成長・淘汰をモデル化した競争型仮想細胞群を用いることで解決を図っている。このシステムは対象データの特徴をエネルギー源とし、細胞間の獲得競争によりマスマーブメントデータの特徴を自動的に選択するものである。実験ではデータとして画像を用い、提案した手法を組換え可能型回路と制限付き関数の形式で実装し、このシステムにより画像領域ごとのデータ特徴量が自動的に抽出可能であるという知見を得ている

さらに、提案したアプローチによるロボット制御規則抽出システムの実装として、SMA-Net Robot とよばれる分散型軟性機械とその制御・計測システムの構築を行い、実機への応用が図られている。

以下に本論で得られた成果を示す。

1. 従来の状態遷移規則を設定したセルラーオートマタによるマスマーブメント解析手法を検証しその限界点を指摘したこと。
2. セルラーオートマタの状態遷移規則の自動抽出法を導出することで、従来のセルラーオートマタによるマスマーブメント解析の自動化を実現したこと。
3. マスマーブメントを質点系の集合としてとらえ、マルチエージェントシステムとして解析する手法を導出したこと。
4. 従来は解析者が定めていたマスマーブメント解析に必須とされる挙動の特徴量そのものを自動的に選択するシステムを導出し、モノクロ画像の特徴量を抽出できるという有用性を検証したこと。
5. 提案したマスマーブメント解析手法の有用性を検証するためのプラットフォームである多要素軟性機械 SMA-Net Robot を構築し、制御法の確立を行ったこと。

これを要するに本論文は、マスマーブメントとよばれる大自由度大変形可能な系という従来工学では扱われなかった問題に対し、その解析法および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自動解析手法に関する有益な知見を得ており、そ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。