

A Study on Smart Control for Collective Agents

（コレクティブエージェントの知的制御に関する研究）

学位論文内容の要旨

自然界においては生物が群れを成すことによって環境に適応する例が多々見られる。このような例としては蜂や蟻に見られる社会的行動、草食動物や魚群の移動行動、アメーバの繁殖行動、等がある。このような、あたかも群が知をもつような適応行動を人工的に実現しようとする研究が行われ始めたのはつい最近である。その理由は従来のような中央集権的なシステム構築における限界が明らかになってきたためである。

群の行動に関する研究は主に分散人工知能（DAI）、人工生命（AL）、及びロボティクスの分野で行われてきた。DAI の分野では多数のシステム要素に関する協調と競合の研究、AL の分野では人工的にあり得る生命とその行動の創発、ロボティクスの分野ではマルチエージェントシステムに関する研究、等が中心に行われてきた。しかしながら、これらの研究においてはシステムの要素とそれらを取り巻く動的な環境のおりなす複雑性に対し、自然界の生物が群れを成すことによって機能を創発し、動的環境に適応するような根本的な概念と方法論を与えていない。すなわち、システム要素が群を構成することによって得られる特性、(1)自律性、(2)分散、(3)冗長性、(4)適応性、(5)堅固性、(6)機能創発、(7)同一目的性、等を統一的に実現していないと言える。従って、システムの要素とそれらを取り巻く動的な環境のおりなす複雑性に対し、人工的な群れを構成することにより機能を創発し、動的環境に適応するような新しい概念と方法論が必要となっている。

本論文では、人工的なシステム要素を群として構成し、動的な環境下で群の機能創発と適応を実現する統一的な概念と方法論を技術として確立することを目的としている。このようなアプローチは、従来のシステム論が最適性を追求し冗長性、適応性、機能創発を持たない点、DAIが自律性、分散、適応性を追求し、冗長性、機能創発を持たない点、ALが自律性、分散、機能創発を追及し、適応性、同一目的性を持たない点、ロボティクスが自律性、分散、適応性、冗長性を追求し、堅固性、機能創発を持たない点、において異なっている。

このような背景下で、本研究では対象物を人工のシステムに限定し、システムをその要素としての群エージェントと要素を取り巻く動的環境によって定義し、これらをコレクティブエージェントの知的制御問題と名付け、このような問題を解決する新しい数理モデルと方法論を提案し、展開している。数理モデルでは、ここで定義した知的制御問題が本来的に具備している基本的性質及びシステムの構成要件等を明確にし、方法論としてはコレクティブエージェントの適応戦略機構を提案している。提案された適応戦略機構は従来の枠組みである DAI、AL、及びロボティクスにおけるマルチエージェントシステムを総括的に取り扱うことが可能であることも明確にしている。更に、提案された数理モデルと方法論が具体的なコレクティブエージェントの知的制御問題へ適用され、それらの有効性がシミュレーション及び数値計算実験によって検証されている。

本論文の第 1 章では、DAI、AL、ロボティクスの背景が述べられ、本研究を着手するに

至った動機が述べられている。

2 章では、コレクティブエージェント (CA) のための適応戦略機構モデルを数理モデルとして取り扱う方法が提案されている。このモデルに基づくシステムをコレクティブエージェントシステム (CAS) とし、具体的には適応システムの概略、適応システムを実現するための技術として遺伝的アルゴリズムと強化学習の方法論が示され、CAS における環境とエージェントの定義、この定義に基づく CAS の定式化が示される。その後、適応戦略システムとしての CAS の実行プロセスをつかさどる適応プラン、選択プラン、コレクティブパターン及び環境からの評価の枠組みが示され、コレクティブパターン形成のための適応戦略機構モデルが確立されている。また、システムのダイナミクスを表現するための時系列を用いたモデルの定式化が導出されている。

3 章～5 章では、2 章で導かれたコレクティブエージェントの適応戦略機構モデルの具現化をなす具体的な問題により、コレクティブパターンを生成、制御するための種々の方法論が述べられている。

3 章では、閉領域内を行動する自律移動ロボットをコレクティブエージェントとし、熱力学のアナロジーをとることにより自律移動ロボット群の行動を制御する問題に対して適応機構戦略モデルが適用されている。CAS が熱力学系とのアナロジーをとることが可能な熱力学的パラメータを抽出するために実ロボットとシミュレータによるロボットの行動を観測・計測する方法論が示されている。本研究では、行動パターンとエントロピー、圧力、内部エネルギーによる状態量の比較・検討を行い、これらの関係が示されている。このような熱力学パラメータを利用したロボットの制御に関する研究例は極めて少なく、実ロボットの行動を計測し行動パターンと状態量との関係を示したものはない。次に、この状態量を CAS における環境からの評価として用い、コレクティブパターンとしてロボット群の行動を遺伝的アルゴリズムと強化学習により制御する方法論が述べられている。実験結果から、適応戦略機構モデルにおける環境からの評価としての状態量をフィードバックとして適応プラン、選択プランを実現する遺伝的アルゴリズムや強化学習により望ましいコレクティブパターンとしてのロボットの行動パターンを獲得可能なことが検証されている。

4 章では、コレクティブパターンの制御にクラシファイアシステムが適用される。3 章では環境からの評価に注目していたが、ここではクラシファイアシステムの報酬系によって表現される階層的構造をもつ選択プランに注目している。閉領域の出口から外に抜け出る問題を設定し、領域内に存在するエージェント群が構成するパターンから外部に存在するという目的パターンへ遷移するパターン制御に適応戦略機構モデルを適用する。本研究ではコレクティブエージェントの行動結果は共有知識として強度マップに保存・更新され、報酬系が強度を決定する。クラシファイアシステムには複数の報酬系を設定可能という特徴があるが、報酬系をひとつに限定した場合、エージェント数の増加により学習の進行が妨げられ、適応システムとして成り立たないことが示されている。多数のエージェントであっても複数の適応プランを適応的に切替えることにより良好な学習結果が得られ、求めるコレクティブパターンを獲得可能なことが示されている。切替え基準は強度マップの強度によって関数化されている。

5 章では、コレクティブパターンの発生に感情モデルが適用されている。各エージェントは 2 次元の内部状態と動力学により交際範囲に存在する他のエージェントと相互作用することにより内部状態を更新し、自身の位置を決定するという選択プランによってコロニーで表されるコレクティブパターンを発生可能なことが示されている。

6 章では、数理モデルから導出された適応戦略機構モデルが、コレクティブエージェントのパターン形成・制御を実現することが示され、その具体的な事例として各章での異なる方法論による対象問題への適用方法とその実験結果による検証が要約されている。

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

A Study on Smart Control for Collective Agents

(コレクティブエージェントの知的制御に関する研究)

本論文では、対象物が人工システムに限定されており、システムはその要素としてのコレクティブエージェントと要素を取り巻く動的環境から定義されるコレクティブエージェントシステムが対象とされ、コレクティブエージェントの機能創発と適応の実現を知的制御問題と名付け、このような問題を解決する新しい数理モデルと方法論が提案され、展開されている。数理モデルでは、ここで定義した知的制御問題が本来的に具備すべき基本的性質及びシステムの構成要件等が明確にされ、方法論としてはコレクティブエージェントの適応戦略機構が提案されている。提案された数理モデルと方法論が具体的なコレクティブエージェントの知的制御問題へ適用され、それらの有効性がシミュレーション及び数値計算実験によって検証されている。

1 章は、序論である。

2 章では、コレクティブエージェント (CA) のための適応戦略機構モデルを数理モデルとして取り扱う方法が提案されている。このモデルに基づくシステムをコレクティブエージェントシステム (CAS) とし、具体的には適応システムの概略、適応システムを実現するための技術として遺伝的アルゴリズムと強化学習の方法論が示され、CAS における環境とエージェントの定義、この定義に基づく CAS の定式化が示されている。その後、適応戦略システムとしての CAS の実行プロセスをつかさどる適応プラン、選択プラン、コレクティブパターン及び環境からの評価の枠組みが示され、コレクティブパターン形成のための適応戦略機構モデルが確立されている。また、システムのダイナミクスを表現するための時系列を用いたモデルの定式化が導出されている。

3 章～5 章では、2 章で導かれたコレクティブエージェントの適応戦略機構モデルの具体的な問題が取り扱われ、コレクティブパターンを生成、制御するための種々の方法論が提案され、それらの有効性が検証されている。

3 章では、閉領域内を行動する自律移動ロボットがコレクティブエージェントとモデル化され、その熱力学のアナロジーから自律移動ロボット群の行動を制御する問題に対して適応機構戦略モデルが適用されている。すなわち、CAS と熱力学のアナロジーの確立のために、熱

力学的パラメータを同定することを目的とした実ロボットとシミュレータによる群ロボットの行動を観測・計測する方法論が示されている。この結果、熱力学アナロジーとの同定パラメータとして、エントロピー、圧力、内部エネルギーが CAS に有効なパラメータとして同定され、行動パターンが状態量とみなしたそれらパラメータと比較・検討され、これらの相互関係が明確にされている。このような熱力学パラメータを利用したロボットの制御に関する研究例は少なく、実ロボットの行動が実験的に計測され、行動パターンと状態量との関係が明らかにされている。次に、この状態量が CAS における環境からの評価として採用され、コレクティブパターンとしてロボット群の行動が遺伝的アルゴリズムと強化学習から制御される方法論が提案されている。実験結果から、適応戦略機構モデルにおける環境からの評価としての状態量をフィードバックとして適応プラン、選択プランを実現する遺伝的アルゴリズムや強化学習により望ましいコレクティブパターンとしてのロボットの行動パターンを獲得可能なことが検証されている。

4 章では、コレクティブパターンの制御に適応戦略機構から導かれるクラシファイアシステムが適用されている。3 章では環境からの評価が注目されていたが、ここではクラシファイアシステムの報酬系によって表現される階層的構造をもつ選択プランが注目されている。すなわち、コレクティブエージェントが閉領域の出口から外に抜け出す問題が設定され、領域内に存在するエージェント群が構成するパターンから外部に存在するという目的パターンへと遷移するパターン制御に適応戦略機構モデルが適用されている。本章ではコレクティブエージェントの行動結果は共有知識として強度マップに保存・更新され、報酬系が強度を決定する方法が採用されている。多数のエージェントに対しては複数の適応プランを適応的に切替える戦略が良好な学習結果を導き、求められるべきコレクティブパターンを獲得可能なことが示されている。

5 章では、コレクティブパターンの発生に適応戦略機構からモデル化した感情モデルが提案されている。すなわち、感情を表現する 2 次元の内部状態とエージェント間の動力学から各エージェントの交際範囲が定義されている。ここで取り扱われている CAS では、エージェントは感情を表現する 2 次元の内部状態とエージェント間の動力学から更新され、これらの更新された内部状態に基づいて、エージェントの位置が決定される選択プランが採用されている。実験結果からは、このようなエージェントはコロニーで表現されるコレクティブパターンを発生することが明らかにされている。

これを要するに、著者はコレクティブエージェントの適応戦略機構数理モデルを群行動制御問題に適用し、熱力学のアナロジーから実験的に観測・計測した移動群ロボットの熱力学パラメータ同定と、それに基づいた移動群ロボット行動の適応・制御問題へ適用する方法論の開発、クラシファイアシステムによる共有知識場の自律エージェントの適応的行動への応用と経路獲得への理論展開と実験による検証、感情の相互作用を組み込んだエージェント間のコレクティブパターンの生成、を通してコレクティブエージェントシステムに対して展開した理論の正当性、有効性を検証した。これにより知能機械工学に関する研究分野において多くの新知見を得たものであり、システム工学、情報工学、および複雑系工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

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。